

Étude-test portant sur l'analyse de l'impact environnemental des modes d'habitat à Genève avec études de cas

Rapport final

État de Genève

Département du territoire (DT)

Secrétariat général / Office cantonal de l'environnement / Office cantonal de l'énergie / Office de l'urbanisme / Service cantonal du développement durable

Janvier 2020

Document réalisé par :

Sofies SA (siège)

Quai du Seujet 28 - CP 2091

1211 Genève 1

Suisse

+41 22 338 15 24

www.sofiesgroup.com

Et :

Ecometrics

2 rue Faller

1202 Genève

Suisse

+41 78 611 40 64

www.ecometrics.ch

Auteurs

Damien Friot, Ecometrics (damien.friot@ecometrics.ch)

Alban Bitz, Sofies (alban.bitz@sofiesgroup.com)

Table des matières

1	Résumé	6
1.1	Contexte et objectifs	6
1.2	Méthodologie	6
1.3	Analyse	10
1.4	Conclusions et perspectives	12
2	Introduction	14
2.1	Contexte	14
2.2	Objectifs du rapport	14
3	Méthodologie	15
3.1	Les modes d'habitat	15
3.2	Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie	16
4	Les modes d'habitat	17
4.1	Description et cartographie	17
4.2	Le logement : caractéristiques déterminantes	20
4.3	La mobilité pendulaire : caractéristiques déterminantes	23
5	Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie	26
5.1	Analyse des contributions du logement et de la mobilité pendulaire	26
5.2	Comparaison de l'impact environnemental des modes d'habitat	27
5.3	Analyses de sensibilité	30
6	Limites de l'étude	33
6.1	Le logement	33
6.2	La mobilité pendulaire	33
7	Conclusion et perspectives	34
7.1	Réponse aux hypothèses de travail	34
7.2	Perspectives	35

8	<u>Références</u>	37
9	<u>Annexe 1. Modélisation du logement</u>	38
9.1	Les impacts environnementaux du logement : état des connaissances	38
9.2	Dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques	40
9.3	Sept modes d'habitat basés sur les cas d'étude	42
10	<u>Annexe 2. Modélisation de la mobilité pendulaire</u>	45
10.1	Les impacts environnementaux de la mobilité : état des connaissances	45
10.2	La mobilité pendulaire	46
11	<u>Annexe 3. Hypothèses de travail</u>	47

Liste des figures

Figure 1. Localisation des périmètres utilisés pour illustrer les modes d'habitat.	9
Figure 2. Comparaison des modes d'habitat (en kg de CO ₂ -équivalent par personne par an).	10
Figure 3. Localisation des périmètres utilisés pour illustrer les modes d'habitat.	19
Figure 4. Découpage typologique de Genève. Source : OCSTAT.....	24
Figure 5. Contribution (en %) du logement et de la mobilité pendulaire au réchauffement climatique par personne par an.....	26
Figure 6. Résultats par mode d'habitat (logement et mobilité pendulaire) (en kg de CO ₂ - équivalent par personne par an).	27
Figure 7. Ecopoints par type de bâtiment en Suisse (limite = valeur limites). Source : (Kaenzig et Jolliet, 2006).....	38
Figure 8. Ecopoints par mode de transport (écopoints/personne.km). Source : (Kaenzig et Jolliet, 2006).....	45

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des dix-sept modes d'habitat sélectionnés.	8
Tableau 2. Description des dix-sept modes d'habitat sélectionnés.	18
Tableau 3. Destinations et origines des pendulaires intra-cantonaux (en %). Source : OCSTAT T_11.06.2.07 pour les années 2012 à 2016.	23
Tableau 4. Résultats par mode d'habitat (en kg de CO ₂ -équivalent par personne par an)...	28
Tableau 5. Mobilité pendulaire : émissions de Gaz à effet de serre (kg CO ₂ -équivalent par personne par an) par mode de transport selon le lieu d'habitation par zone typologique du canton de Genève, Vaud (Nyon - aggro) et la France.....	30
Tableau 6. Mobilité quotidienne : émissions de Gaz à effet de serre (kg CO ₂ -équivalent par personne par an) par mode de transport selon le lieu d'habitation par zone typologique du canton de Genève, Vaud (Nyon - aggro) et la France.....	32
Tableau 7. Mobilité pendulaire : Distance annuelle moyenne (km) parcourue par mode de transport et par périmètre. Source : Observatoire statistique de la mobilité.	46

1 Résumé

1.1 Contexte et objectifs

La structure de l'urbanisation de l'agglomération du Grand Genève se caractérise par un centre-ville dense, des couronnes urbaines en pelures d'oignon densifiées et en cours de densification, des villes « périphériques », des zones villas et des villages. Ces derniers sont également en mutation par une densification progressive.

La structure de l'urbanisation peut être associée à différents « **modes d'habitat** », qu'il est possible de qualifier, par exemple, en termes de consommation de sol, de ressources pour les constructions ou de consommation énergétique et de déplacements pendulaires.

Le Département du territoire souhaite **déterminer l'impact environnemental de ces différents modes d'habitat du Grand Genève**, selon un échantillon sélectionné du territoire genevois complété par des cas d'études situés dans le Grand Genève vaudois ainsi qu'en France voisine. Le Département du territoire a sollicité Sofies et Ecometrics pour un mandat d'étude sur le sujet.

Ce rapport présente les **résultats d'une première phase servant à développer une méthodologie robuste**, fondée sur des bases scientifiques reconnues, et apportant des réponses quant à l'impact environnemental actuel des différents modes d'habitat.

1.2 Méthodologie

Dix-sept modes d'habitat ont été sélectionnés afin d'illustrer la diversité des modes d'habitat du canton de Genève et du Grand Genève. La notion « mode d'habitat » est ici définie de manière restrictive¹, couvrant deux composantes choisies pour leur aspect non-discrétionnaire (c'est-à-dire pas uniquement dépendant d'aspects comportementaux ou de préférences personnelles) : le **logement**, pour lequel sont considérés la consommation d'énergie (chauffage et eau chaude sanitaire) ainsi que les matériaux du bâti, et la **mobilité pendulaire** (pour se rendre du domicile au lieu de travail), pour laquelle sont considérés l'infrastructure, les véhicules ainsi que la consommation d'énergie.

Chaque mode d'habitat est basé sur un **exemple concret et les données disponibles les plus fines possibles** ont été utilisées pour la modélisation. Compte tenu de la qualité et de la granularité de celles-ci (les données de la mobilité pendulaire sont, par exemple, uniquement disponibles au niveau des quatre zones typologiques du canton de Genève), les résultats présentés doivent être considérés comme une **approximation** (tous les modes d'habitats situés dans la 2ème couronne, ont, par exemple, dans le modèle le même impact environnemental induit par la mobilité pendulaire).

Cette approximation semble cependant suffisante pour comprendre à quel point les modes d'habitat, ainsi que les impacts environnementaux qu'ils induisent, diffèrent entre eux et quelles en sont les causes directes.

Dix modes d'habitat ont été sélectionnés de manière intuitive afin de représenter la majorité des modes d'habitat à Genève, au niveau de leurs paramètres (typologie de bâtiments, source d'énergie, distance au bassin d'emploi, etc.). La composante « logement » de ces dix modes d'habitat a été

¹ Il est à noter que d'autres définitions seraient envisageables. Une définition plus large, serait, par exemple, de considérer le quartier comme l'échelle d'analyse pertinente et donc de prendre en compte également les infrastructures (équipements publics comme les écoles, centres commerciaux, etc.). Une autre serait de considérer les autres motifs de mobilité (éducation, achats, loisirs) : la mobilité pendulaire ne représente, en effet, que 14% des distances parcourues à Genève quotidiennement. Cette définition restrictive pourrait ainsi potentiellement mener à une analyse erronée car partielle. Cette approche semble néanmoins acceptable au regard des objectifs de l'étude qui consiste à orienter des décisions relatives à l'aménagement du territoire à Genève et non à influencer des choix comportementaux.

modélisée à partir des données statistiques existantes à **l'échelle de sous-secteurs statistiques**. Ces secteurs sont généralement constitués d'un ensemble plus ou moins homogène de bâtiments, par exemple Eaux-Vives - Vollandes ou Satigny-Village.

Une approche complémentaire a été appliquée afin d'évaluer des **quartiers récents** ou des quartiers situés à l'extérieur du canton de Genève, dans la mesure où les données statistiques ne sont pas (encore) disponibles. La composante « logement » de ces **sept modes d'habitat supplémentaires a ainsi été évaluée à partir de cas d'étude concrets**, en se basant sur une modélisation détaillée des caractéristiques du bâtiment. La composante « mobilité pendulaire » a, quant à elle, été modélisée à partir de **données statistiques à l'échelle des zones typologiques** complétées par des hypothèses complémentaires pour les localisations hors du canton de Genève.

Les modes d'habitat sont évalués à l'aide d'une approche appelée « **Analyse du Cycle de Vie** » (ACV) ou écobilan (Jolliet et al., 2018). L'ACV permet de comptabiliser les multiples impacts environnementaux générés par un mode d'habitat de manière systémique, en considérant tant les impacts liés à la fabrication et la fin de vie du bâti, des routes ou des voitures que ceux liés à leur utilisation (production et consommation d'énergie pour le chauffage ou carburants des modes de transport par exemple). Les impacts environnementaux sont ainsi tous ramenés à une grandeur comparable, un même service rendu :

« Se loger et se rendre sur son lieu de travail pour une personne durant une année. »

Il s'agit ainsi d'une empreinte environnementale partielle d'une personne et les impacts sont évalués par personne par an (une personne moyenne durant une année). Cette personne moyenne est estimée en prenant en compte l'ensemble de la population. Concernant le logement, cela signifie que les adultes comme les enfants sont considérés sans distinction. Concernant la mobilité pendulaire, cela signifie que les distances considérées prennent en compte le fait qu'une partie de la population uniquement est active.

Un aperçu des valeurs considérées pour chacun des modes d'habitat est donné dans le Tableau 1 ci-dessous. La carte de la Figure 1 montre leur localisation.

#	Type / surface (m2.hab) / densité*	Mobilité pendulaire		Energie de chauffage			Exemple sélectionné
		Zone typologique	Modes de transport**	IDC [MJ/m ²]	Quantité (MJ.hab)	Agents énergétiques	Sous-secteur statistique/ commune
A	Immeubles 1920 & 1980 / 38 m2 / +++	Centre	44% trans. collectif 32% voiture	423	16067	40% gas 36% mazout	Sainte-Clotilde (Ville de Genève)
B	Immeubles 1920 & 1980 / 41 m2 / +++	Centre	44% trans. collectif 32% voiture	449	18252	60% mazout 40% gas	Eaux-Vives-Vollandes (Ville de Genève)
C	Grandes barres d'immeubles / 34 m2 / +++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	406	14006	50% gas 50% déchets	Les Avanchets (Vernier)
D	Grandes barres d'immeubles / 34 m2 / +++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	396	13643	50% gas 50% déchets	Cité-Nouvelle (Onex)
E	Immeubles anciens / 42 m2 / ++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	432	18252	54% gas 46% mazout	Vieux Carouge (Ville de Carouge)
F	Immeubles récents > 2010 / 30-36 m2 / +++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	200	7026	50% gas 50% déchets	La Chapelle (Lancy)
G	Petites villas 1950 / 39 m2 / -	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	544	21132	68% gas 31% mazout	Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)
H	Petits immeubles 1950 & 2000 / 35 m2 / +	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	461	16194	57% gas 40% mazout	Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)
I	Immeubles récents > 2010 - eco / 30-36 m2 / +++	Deuxième couronne	33% trans. collectif 49% voiture	200	6941	50% gas 50% déchets	Les Vergers (Meyrin)
Ibis	Immeubles récents > 2010 - eco / 30-36 m2 / +++	Deuxième couronne	44% trans. collectif 32% voiture	200	6941	50% gas 50% déchets	Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)
J	Village en cours de densification / 36 m2 / +/-	Deuxième couronne	33% trans. collectif 49% voiture	366	13120	47% mazout 45% gas	Satigny-village (Satigny)
K	Grandes villas / 69 m2 / -	Périurbain	25% trans. collectif 57% voiture	437	30136	85% gas 13% mazout	Ruth-Nant d'Argent (Cologny)
L	Petit village rural / 45 m2 / -	Périurbain	25% trans. collectif 57% voiture	392	17537	100% mazout	Le Pigeonnier (Avusy)
M	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	Vaud	27% trans. collectif 70% voiture	300	13493	100% mazout	Dullier (Canton de Vaud)
N	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	France proche	7% trans. collectif 80% voiture	300	13493	71% mazout 29% électricité	Machilly (France)
Nbis	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	France proche	33% trans. collectif 46% voiture	300	13493	71% mazout 29% électricité	Machilly avec Léman Express (France)
O	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	France lointain	7% trans. collectif 80% voiture	300	13493	71% mazout 29% électricité	Poisy (France)

* de forte (+++) à faible (-)

** en % des kilomètres parcourus quotidiennement pour un motif de travail.

*** villa modélisée identique

Tableau 1. Description des dix-sept modes d'habitat sélectionnés.

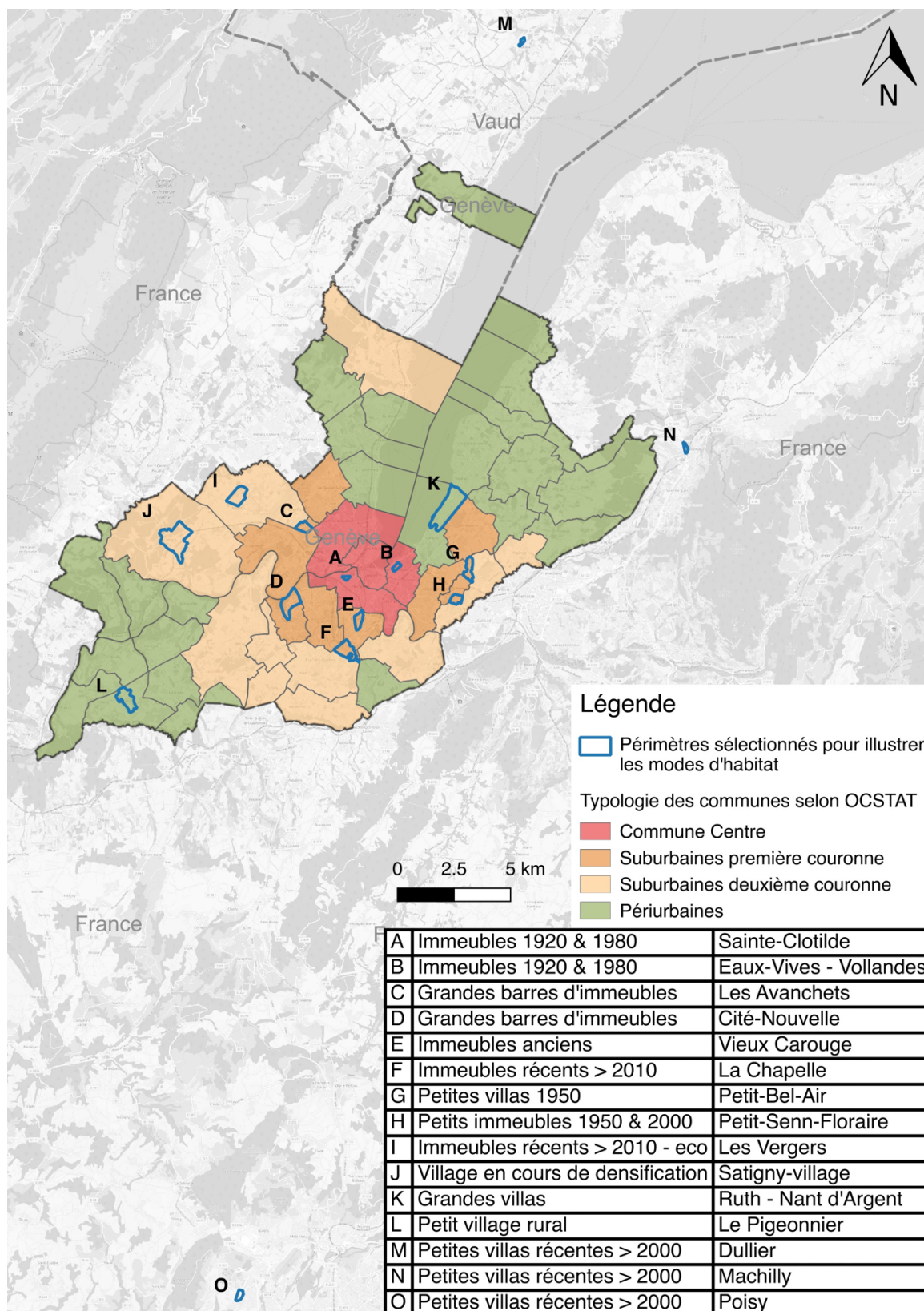


Figure 1. Localisation des périmètres utilisés pour illustrer les modes d'habitat.

1.3 Analyse

Les résultats obtenus pour les différents modes d'habitat sont présentés en Figure 2 (impact sur le réchauffement climatique en kg de CO₂-équivalent par personne par an), en distinguant les impacts liés au logement (en bleu) et ceux découlant de la mobilité pendulaire (en gris).

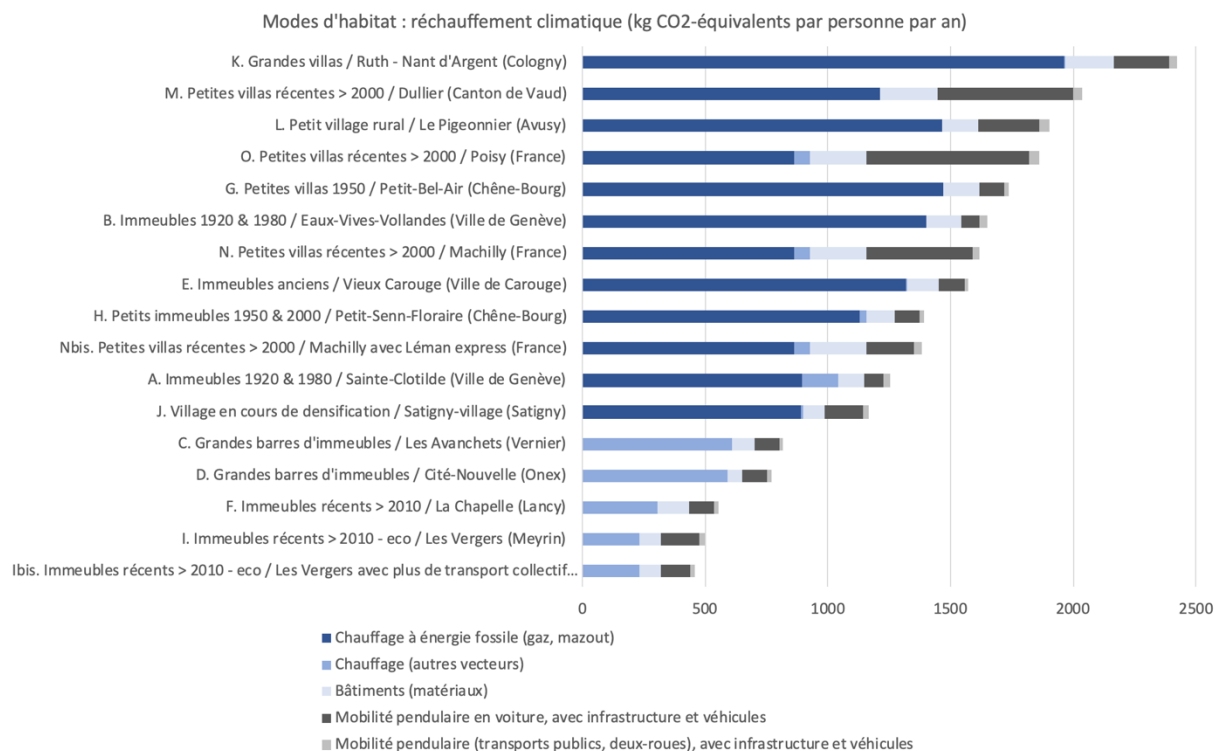


Figure 2. Comparaison des modes d'habitat (en kg de CO₂-équivalent par personne par an).

L'impact environnemental de chacun des modes d'habitat² est dominé par le logement : de 64% dans le cas du mode I (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers (Meyrin)) à 94% dans le cas du mode B (Immeubles 1920 et 1980 - Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)). Dans le logement, c'est l'impact environnemental du chauffage et de l'eau chaude sanitaire qui est dominant : entre 70% dans le cas du mode F (Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)) et 91% dans le cas des modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques (par définition). Cet impact est largement dominé par les énergies fossiles (gaz et mazout). L'impact environnemental du bâti (matériaux de construction) est, quant à lui mineur : entre 9% dans le cas des modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques (par définition, voir Annexe 1) et 30% dans le cas du mode F (Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)). En effet, plus le bâtiment est performant au niveau de la consommation d'énergie thermique, plus la part d'énergie « grise » des matériaux de construction est significative.

L'impact environnemental de la mobilité pendulaire est largement dominé par les trajets en voiture (entre 72% dans le cas du mode B (Immeubles 1920 et 1980 / Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)) et 94% dans le cas du mode O (Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France))). Cet impact est dominé par la phase d'utilisation, donc typiquement l'essence (plus de 60%). Viennent ensuite l'impact de l'infrastructure et celui des véhicules.

² Tels que définis dans la méthodologie de ce rapport.

Le mode d'habitat avec la meilleure performance environnementale est le mode d'habitat Ibis (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)) tandis que la pire performance peut être observée pour le mode habitat K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)), **environ cinq fois plus élevée.**

La bonne performance du mode d'habitat Ibis (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)) est expliquée par une part élevée d'énergie non-fossile (raccordement au CAD), une surface moyenne par personne faible (30-36 m²) dans des immeubles récents avec un standard énergétique élevé (IDC : 200 MJ/m²). Elle est aussi expliquée par des distances de mobilité pendulaire limitées et une utilisation significative des transports publics (44%).

La mauvaise performance du mode d'habitat K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)) est expliquée par les arguments inverses : une utilisation importante d'énergie fossile (mazout), une surface habitée par personne la plus élevée (69 m²) et un IDC : 437 MJ/m². Elle est aussi expliquée par une plus grande distance au lieu de travail et une utilisation plus importante de la voiture (57%).

Il semble possible de classer les modes d'habitat en quatre groupes distincts :

- **Un premier groupe de modes d'habitat (émissions : 0.4 – 0.8 tonne de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par de **faibles surfaces habitées par personne** (< 36 m²) et un **chauffage sans énergie fossile**. Il comprend les immeubles récents (Ibis. Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin), I. Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers (Meyrin), et F. Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)) et les grandes barres d'immeubles chauffées au chauffage à distance (CAD) (D. Grandes barres d'immeubles / Cité-Nouvelle (Onex), et C. Grandes barres d'immeubles / Les Avanchets (Vernier)).
- **Un deuxième groupe de modes d'habitat (émissions : 1.2 – 1.4 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par des **faibles surfaces habitées par personne** (< 38 m²) et un chauffage à dominante gaz ou un chauffage partiellement à l'électricité mais avec des surfaces habitées plus grandes. Il comprend les modes d'habitat J (Village en cours de densification / Satigny-village (Satigny)), A (Immeubles 1920 & 1980 / Sainte-Clotilde (Ville de Genève)), Nbis (Petites villas récentes > 2000 / Machilly avec Léman express (France)) et H (Petits immeubles 1950 & 2000 / Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)).
- **Un troisième groupe de modes d'habitat (émissions : 1.5 – 1.7 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par un élément avec grand impact : soit une consommation d'énergie importante, un chauffage à dominante mazout ou de longues distances parcourues en voiture pour la mobilité pendulaire. Il comprend des petites villas récentes ou non (N. Petites villas récentes > 2000 / Machilly (France) et G. Petites villas 1950 / Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg) et des immeubles (B. Immeubles 1920 & 1980 / Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)).
- **Un quatrième groupe de modes d'habitat (émissions : 1.9 – 2.4 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par deux ou plusieurs aspects à grand impact : une grande consommation énergétique, un chauffage à dominante mazout ou de longues distances parcourues en voiture. Il comprend des villas (O. Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France), M. Petites villas récentes > 2000 / Dullier (Canton de Vaud), et K. Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)) ainsi que des habitations villageoises (L. Petit village rural / Le Pigeonnier (Avusy)).

A titre de comparaison, l'OFEV estime que les **émissions sur le territoire suisse** (sans inclure le transport aérien international) étaient de **5.6 tonnes de CO₂-équivalent par personne et par an**

2017 et de 14 t.CO₂-éq/pers/an selon une approche orientée « consommation », c'est-à-dire considérant l'ensemble des émissions induites par une personne durant une année pour satisfaire son mode de vie, où que celles-ci aient lieu dans le monde. Le Conseil fédéral a décidé en août 2019 que la Suisse réduira à zéro ses émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050³. D'après l'OFEV, le seuil correspondant aux limites planétaires serait de 1 à 1,5 t.CO₂-éq/pers/an d'ici à 2050 et 0.6 t.CO₂-éq/pers/an d'ici la fin du siècle⁴.

1.4 Conclusions et perspectives

Cette étude pose les bases méthodologiques permettant d'évaluer l'impact environnemental d'une sélection de modes d'habitat existants actuellement dans le canton de Genève. **Les premiers résultats permettent d'identifier les facteurs clés des impacts environnementaux** et déterminer les besoins supplémentaires pour disposer d'une méthode robuste et répliquable.

Les résultats fournis dans cette étude sont une première étape riche d'enseignements et qui démontre la pertinence d'utiliser l'outil d'Analyse de Cycle de Vie pour comparer l'impact environnemental de différents modes d'habitat.

La méthodologie proposée dans ce rapport ouvre les perspectives suivantes :

- L'application de la méthode à des cas spécifiques **d'aide à la décision** pour prendre en compte les objectifs climatiques dans les planifications territoriales (p. ex. densité requise ou taux de report modal minimal d'un quartier par rapport à des objectifs supérieurs, tels que ceux du Plan climat cantonal) est possible moyennant quelques développements supplémentaires.
- L'application de la méthode pour une **cartographie de l'ensemble du canton de Genève** (ou à une nouvelle série de quartiers ou secteurs géographiques) est possible mais requière cependant des développements supplémentaires pour affiner les données⁵. Cette extrapolation permettrait d'évaluer l'étendue et la répartition des modes d'habitat à l'échelle cantonale ou encore d'effectuer un diagnostic plus poussé de l'effet des évolutions à venir (Genilac, Leman Express) pour identifier les secteurs où de nouvelles mesures devraient être prises.
- La modélisation développée pour effectuer l'ACV de bâtiments réels (cas F, I, Ibis, M, N, Nbis et O) mériterait d'être valorisée pour **vulgariser l'impact des choix architecturaux en termes de choix de matériaux ou énergétiques**. En effet, bien qu'il existe, de nombreux instruments à l'intention des maîtres d'ouvrage tels que les eco-devis, les eco-CFC et les données des écobilans (plateforme eco-bau)⁶, des recueils de bonnes pratiques (plateforme "Bilan carbone chantier et bâtiment")⁷, ainsi que des outils de modélisation (tels que Eco-Bat), il n'existe pas à ce jour de document public offrant une comparaison synthétique entre les impacts des différents types de bâtiments⁸.

³ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/objectif-climat2050.html>

⁴ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/en-bref.html#-1333200555>

⁵ En effet, dans le cas de tissu urbain hétérogène ou en mutation avec de nombreux bâtiments récents, les données statistiques sont parfois incomplètes (population, IDC, etc.) et les distances de transport (ainsi que les modes de transport) à déterminer.

⁶ www.eco-bau.ch

⁷ <https://maneco-exp.izypeo.net/login>

⁸ Des publications récentes de l'EPFL mettent d'ailleurs en évidence le manque d'intégration des outils d'ACV par les maîtres d'ouvrage et les architectes (p.ex. <https://infoscience.epfl.ch/record/271500?ln=en>)

D'un point de vue méthodologique, le logement et la mobilité pendulaire sont considérés de manière adéquate. Néanmoins, **l'amélioration de la robustesse du modèle** (fiabilité et granulométrie des données) **est souhaitable**. Ce travail doit se faire en collaboration avec les services spécialisés puisque les données ne sont actuellement pas disponibles dans le domaine public :

- Surface habitée des logements : affinage des méthodes statistiques (OU/OCSTAT) ;
- Chaleur : exploitation des données finales de l'étude IDC et compléments de données à obtenir pour les villas (OCEN) ;
- Distances et modes de transport au niveau des communes/sous-secteurs : génération de données plus précises que celles disponibles dans le Microrecensement (limité aux zones typologiques) et développement de scénarios spécifiques (p. ex. comparaison entre 2 comportements de navetteurs plutôt qu'en utilisant les données de mobilité pendulaire moyennées de l'ensemble de la population), en considérant si possible les facteurs explicatifs du choix de mobilité, comme par exemple la disponibilité de places de stationnement au lieu de domicile et de travail. L'intégration des déplacements pour d'autres motifs serait également intéressante (OCT).

Il est également **souhaitable de mieux comprendre si, et comment, les aspects liés à la biodiversité pourraient être intégrés**. Une étude complémentaire au présent rapport est prévue en collaboration avec l'UNIGE.

2 Introduction

2.1 Contexte

La structure de l'urbanisation de l'agglomération du Grand Genève se caractérise par un centre-ville dense, des couronnes urbaines en pelures d'oignon densifiées et en cours de densification, des villes « périphériques », des zones villas et des villages. Ces derniers sont également en mutation par une densification progressive.

La structure de l'urbanisation peut être associée à différents « modes d'habitat », qu'il est possible de qualifier, par exemple, en termes de consommation de sol, de ressources pour les constructions ou de consommation énergétique et de déplacements pendulaires.

Le Département du territoire souhaite **déterminer l'impact environnemental de ces différents modes d'habitat du Grand Genève**, selon un échantillon sélectionné du territoire genevois complété par des cas d'études situés dans le Grand Genève vaudois ainsi qu'en France voisine. Le Département du territoire a sollicité Sofies et Ecometrics pour un mandat d'étude visant à élaborer une méthodologie d'évaluation et des indicateurs-clés basés sur les outils d'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

2.2 Objectifs du rapport

Les principaux objectifs du présent rapport sont les suivants :

- Apporter des éléments de compréhension quant à l'impact environnemental de différents modes d'habitat représentatifs à Genève ;
- Fournir une aide à la décision en matière d'aménagement du territoire et de durabilité fondée sur des arguments environnementaux scientifiquement solides ;
- Permettre une communication efficace avec des experts et le grand public.

Ce rapport est une **première phase⁹ servant à développer une méthodologie robuste**, fondée sur des bases scientifiques reconnues, et apportant des réponses quant à l'impact environnemental actuel des différents modes d'habitat. Les hypothèses de travail validées avec le groupe de pilotage de l'étude sont présentées en Annexe 3. Une réponse leur est apportée dans le Chapitre 7 (Conclusion). Ces premières réponses pourront être complétées, si besoin est, dans des phases ultérieures, par exemple par l'évaluation de scénarios prospectifs supplémentaires ou la création d'un outil d'analyse interactif d'aide à la décision.

La démarche est tout d'abord brièvement décrite dans le Chapitre 3 (de plus amples explications méthodologiques sont fournies dans les Annexes 1 et 2). Les dix-sept modes d'habitat retenus ainsi que leurs caractéristiques déterminantes sont ensuite décrits dans le Chapitre 4. Les impacts environnementaux des dix-sept modes d'habitat résultant de l'Analyse de Cycle de Vie sont présentés et discutés dans le Chapitre 5. Les limites de l'étude sont décrites dans le Chapitre 6. La conclusion (Chapitre 7) met en évidence des propositions d'approfondissements méthodologiques et des opportunités d'utilisation des résultats à des fins d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire.

⁹ Le mandat a été effectué en deux étapes : premièrement, une exploitation des données statistiques publiquement disponibles (phase 1) et deuxièmement une amélioration de l'estimation des impacts de la mobilité pendulaire ainsi que la prise en compte d'un plus grand nombre de cas d'études portant sur des quartiers récents (phase 1+).

3 Méthodologie

3.1 Les modes d'habitat

Définition et périmètre de l'analyse

Un mode d'habitat peut être défini de plusieurs manières¹⁰. Dans ce rapport, une application restrictive de cette notion est appliquée, couvrant deux composantes choisies pour leur aspect non-discrétionnaire (c'est-à-dire pas uniquement dépendant d'aspects comportementaux ou de préférences personnelles) :

- Le **logement**, pour lequel sont considérés la consommation d'énergie (chauffage et eau chaude sanitaire) ainsi que les matériaux du bâti. Typiquement la consommation d'électricité (hors chauffage) ainsi que l'ameublement intérieur ne sont pas considérés car ils ne sont pas directement liés au mode d'habitat¹¹.
- La **mobilité pendulaire** (pour se rendre du domicile au lieu de travail), pour laquelle sont considérés l'infrastructure, les véhicules ainsi que la consommation d'énergie. Les autres motifs de mobilité (loisirs, achats, etc.) ne sont donc pas considérés dans la mesure où les préférences personnelles jouent un plus grand rôle¹².

Il est à noter que d'autres définitions seraient envisageables. Une définition plus large, actuellement au niveau de la recherche académique, serait, par exemple, de considérer le quartier (et non l'habitat) comme l'échelle d'analyse pertinente et donc de prendre en compte également les infrastructures (équipements publics comme les écoles, centres commerciaux, etc.). Une autre serait de considérer les autres motifs de mobilité (éducation, achats, loisirs¹³) : la mobilité pendulaire ne représente, en effet, que 14% des distances parcourues à Genève quotidiennement¹⁴. Cette définition restrictive pourrait ainsi potentiellement mener à une analyse erronée car partielle. Cette approche semble néanmoins acceptable au regard des objectifs de l'étude qui consiste à orienter des décisions relatives à l'aménagement du territoire à Genève et non à influencer des choix comportementaux. Afin de mieux comprendre les conséquences de ce choix, l'impact de la mobilité quotidienne¹⁵ dans son ensemble est cependant présenté à titre illustratif dans le Chapitre 5.

Sélection des modes d'habitat et données disponibles

Les dix-sept modes d'habitat présentés dans le Chapitre 4 ont été sélectionnés afin d'illustrer la diversité des modes d'habitat du canton de Genève et du Grand Genève.

Dix premiers modes d'habitat ont tout d'abord été sélectionnés de manière intuitive afin de représenter la majorité des modes d'habitat à Genève, au niveau de leurs paramètres (typologie de bâtiments, source

¹⁰ Il n'existe pas de définition officiellement reconnue de la notion « mode d'habitat ».

¹¹ Comme indiqué en Annexe 1, l'électricité varie fortement selon le type de logement (immeuble, maison) et le nombre de personnes dans un ménage. L'étude de son impact serait aussi intéressante mais sort du cadre de ce mandat.

¹² La mobilité pour se rendre sur le lieu de travail dépend d'une combinaison de facteurs (conjuncture économique, choix d'implantation des entreprises, choix individuel du lieu d'habitat et/ou disponibilité de logements correspondant au pouvoir d'achat du ménage, disponibilité de places de stationnement). Une partie de cette mobilité est donc discrétionnaire. Les autres motifs de la mobilité sont également partiellement non-discrétionnaire.

¹³ Le choix de partir en vacances dans un pays lointain ou de rester à proximité ne dépend pas du mode d'habitat mais davantage de préférences personnelles, du pouvoir d'achat, etc.

¹⁴ Office cantonal de la statistique, Microrecensement de la mobilité et des transports pour l'année 2015.

¹⁵ Telle que définie dans le Microrecensement mobilité et transports 2015 (OFS/ARE).

d'énergie, distance au bassin d'emploi, etc.). La composante « logement » de ces dix modes d'habitat a été modélisée **à partir des données statistiques existantes** à l'échelle de sous-secteurs statistiques¹⁶. Ces secteurs sont généralement constitués d'un ensemble plus ou moins homogène de bâtiments, par exemple Eaux-Vives - Vollandes ou Satigny-Village. La composante « mobilité pendulaire » a, quant à elle, été modélisée à partir de données statistiques à l'échelle des zones typologiques¹⁷ (et non des sous-secteurs), celles-ci étant les données statistiquement représentatives les plus fines possible.

Dans un deuxième temps, une autre méthodologie a été déployée pour évaluer la composante « logement » de **quartiers récents** ou des quartiers situés à l'extérieur du canton de Genève, dans la mesure où les données statistiques ne sont pas (encore) disponibles. Ces **sept modes d'habitat supplémentaires** ont ainsi été évalués à partir de cas d'étude concrets, en se basant sur une modélisation détaillée des caractéristiques du bâtiment. La composante « mobilité pendulaire » a, quant à elle, été également modélisée à partir de données statistiques à l'échelle des zones typologiques complétées par des hypothèses complémentaires pour les localisations hors du canton de Genève.

Chaque mode d'habitat est basé sur un **exemple concret et les données disponibles les plus fines possibles** ont été utilisées pour la modélisation. Compte tenu de la qualité et de la granularité de celles-ci (les données de la mobilité pendulaire sont, par exemple, uniquement disponibles au niveau des quatre zones typologiques du canton de Genève), les résultats présentés doivent être considérés comme une **approximation** (tous les modes d'habitats situés dans la 2ème couronne, ont, par exemple, dans le modèle le même impact environnemental induit par la mobilité pendulaire). Cette approximation nous semble cependant suffisante pour comprendre à quel point les modes d'habitat, ainsi que les impacts environnementaux qu'ils induisent, diffèrent entre eux et quelles en sont les causes directes.

Les modes d'habitat sont décrits dans le Chapitre 4. Les sources de données et hypothèses servant à la modélisation sont disponibles dans les Annexe 1 et 2.

3.2 Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie

Une application de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Les modes d'habitat sont évalués à l'aide d'une approche appelée « Analyse du Cycle de Vie » (ACV) ou écobilan (Jolliet et al., 2018). L'ACV permet d'évaluer l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en considérant toutes les étapes de son cycle de vie (extraction des matières premières et énergie, transformation en produit, transport entre les phases, utilisation et fin de vie). Plusieurs indicateurs sont généralement considérés, par exemple le réchauffement climatique et les impacts sur les écosystèmes afin d'obtenir une vision large en matière d'impacts environnementaux.

L'ACV permet ainsi de comptabiliser les multiples impacts environnementaux générés par un mode d'habitat de manière systémique, en considérant tant les impacts liés à la fabrication et la fin de vie du bâti, des routes ou des voitures que ceux liés à leur utilisation (production et consommation d'énergie pour le chauffage ou carburants des modes de transport par exemple).

¹⁶ Tel que définis par le Groupe Interdépartemental de Représentation Cartographique (GIREC) : <https://www.ge.ch/statistique/tel/publications/2006/analyses/etudes/an-ed-2006-40.pdf>. 394 sous-secteurs statistiques sont définis pour le canton de Genève.

¹⁷ La description des zones typologiques est disponible dans le Chapitre 4.3.

Une évaluation de l'impact annuel d'une personne

Afin de pouvoir permettre une comparaison des modes d'habitat, les composantes « logement » et « mobilité pendulaire » doivent être agrégées. Les impacts environnementaux sont ainsi tous ramenés à une grandeur comparable, un même service rendu :

« Se loger et se rendre sur son lieu de travail pour une personne durant une année. »

Les impacts sont ainsi évalués par personne par an (une personne moyenne durant une année). Cette personne moyenne est estimée en prenant en compte l'ensemble de la population. Concernant le logement, cela signifie que les adultes comme les enfants sont considérés sans distinction. Concernant la mobilité pendulaire, cela signifie que les distances considérées prennent en compte le fait qu'une partie de la population uniquement est active.

Indicateur

Un seul indicateur est considéré : le réchauffement climatique, une méthode de l'IPCC agréant l'ensemble des gaz à effet de serre (en kg de CO₂-équivalent (aussi abrégé CO₂-e)).

Il convient de noter que toute prise de décision basée sur les résultats de cette étude, demanderait la prise en compte d'autres indicateurs environnementaux (santé humaine, biodiversité) pour éviter un transfert d'impact sur d'autres problématiques (par exemple une baisse de l'impact « réchauffement climatique » au détriment d'une augmentation des impacts en matière de santé humaine).

Sources des données d'ACV

Les données pour calculer les résultats quantitatifs sont principalement extraites de la base 2016 de la KBOB (Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics). Ces données sont publiques et gratuites. Elles sont, par exemple, reprises dans les cahiers techniques de la SIA (SIA 2031 Certificat énergétique des bâtiments (2009), SIA 2032 Énergie grise (2009), SIA 2039 Mobilité induite (2010) et SIA 2040 En route pour l'efficacité énergétique (2010) ainsi que dans le justificatif MINERGIE-ECO et dans le bilan du projet de société à 2000 watts) (KBOB, 2016).

4 Les modes d'habitat

Les dix-sept modes d'habitat sont tout d'abord présentés. Leurs différentes composantes sont ensuite décrites en faisant ressortir les traits saillants du canton de Genève en termes structurels et environnementaux. Cette description a pour objectif de permettre une meilleure compréhension des enjeux actuels et des aspects clés de la modélisation des impacts.

4.1 Description et cartographie

Les dix-sept modes d'habitat sélectionnés couvrent :

- Une diversité de typologies urbaines de densité variable composée de différents types de bâtiments (petites et grandes villas, petits et grands immeubles, urbanisation pavillonnaire ou villageoise) d'âge variable.
- Une proportion variable des sept types de source d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire : mazout, gaz, chauffage à distance (CAD), pompe à chaleur (PAC), électricité directe, bois pellets et autres.

- Une diversité de localisations influant sur les distances et comportements de mobilité pendulaire (centre, première et deuxième couronnes, périurbain, agglomération de Nyon, France proche et plus lointaine).
- Un usage également variable des quatre modes de transport suivants (parts modales) : voiture, deux-roues motorisé, transport individuel non motorisé (TINM = vélo, marche, etc.) et transport collectif.

Un aperçu des valeurs considérées pour chacun des modes d'habitat est donné dans le Tableau 2 et leur localisation est illustrée en Figure 3.

Pour plus de précisions sur les données et hypothèses ayant servi à décrire de façon chiffrées les modes d'habitat, se référer aux Annexe 1 (Modélisation du logement) et Annexe 2 (Modélisation de la mobilité pendulaire).

#	Type / surface (m2.hab) / densité*	Mobilité pendulaire		Energie de chauffage			Exemple sélectionné Sous-secteur statistique/ commune
		Zone typologique	Modes de transport**	IDC [MJ/m ²]	Quantité (MJ.hab)	Agents énergétiques	
A	Immeubles 1920 & 1980 / 38 m2 / +++	Centre	44% trans. collectif 32% voiture	423	16067	40% gas 36% mazout	Sainte-Clotilde (Ville de Genève)
B	Immeubles 1920 & 1980 / 41 m2 / +++	Centre	44% trans. collectif 32% voiture	449	18252	60% mazout 40% gas	Eaux-Vives-Vollandes (Ville de Genève)
C	Grandes barres d'immeubles / 34 m2 / +++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	406	14006	50% gas 50% déchets	Les Avanchets (Vernier)
D	Grandes barres d'immeubles / 34 m2 / +++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	396	13643	50% gas 50% déchets	Cité-Nouvelle (Onex)
E	Immeubles anciens / 42 m2 / ++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	432	18252	54% gas 46% mazout	Vieux Carouge (Ville de Carouge)
F	Immeubles récents > 2010 / 30-36 m2 / +++	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	200	7026	50% gas 50% déchets	La Chapelle (Lancy)
G	Petites villas 1950 / 39 m2 / -	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	544	21132	68% gas 31% mazout	Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)
H	Petits immeubles 1950 & 2000 / 35 m2 / +	Première couronne	33% trans. collectif 46% voiture	461	16194	57% gas 40% mazout	Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)
I	Immeubles récents > 2010 - eco / 30-36 m2 / +++	Deuxième couronne	33% trans. collectif 49% voiture	200	6941	50% gas 50% déchets	Les Vergers (Meyrin)
Ibis	Immeubles récents > 2010 - eco / 30-36 m2 / +++	Deuxième couronne	44% trans. collectif 32% voiture	200	6941	50% gas 50% déchets	Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)
J	Village en cours de densification / 36 m2 / +-	Deuxième couronne	33% trans. collectif 49% voiture	366	13120	47% mazout 45% gas	Satigny-village (Satigny)
K	Grandes villas / 69 m2 / -	Périurbain	25% trans. collectif 57% voiture	437	30136	85% gas 13% mazout	Ruth-Nant d'Argent (Cologny)
L	Petit village rural / 45 m2 / -	Périurbain	25% trans. collectif 57% voiture	392	17537	100% mazout	Le Pigeonnier (Avusy)
M	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	Vaud	27% trans. collectif 70% voiture	300	13493	100% mazout	Dullier (Canton de Vaud)
N	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	France proche	7% trans. collectif 80% voiture	300	13493	71% mazout 29% électricité	Machilly (France)
Nbis	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	France proche	33% trans. collectif 46% voiture	300	13493	71% mazout 29% électricité	Machilly avec Léman Express (France)
O	Petites villas récentes > 2000 *** / 45 m2 / -	France lointain	7% trans. collectif 80% voiture	300	13493	71% mazout 29% électricité	Poisy (France)

* de forte (+++) à faible (-)

** en % des kilomètres parcourus quotidiennement pour un motif de travail.

*** villa modélisée identique

Tableau 2. Description des dix-sept modes d'habitat sélectionnés.

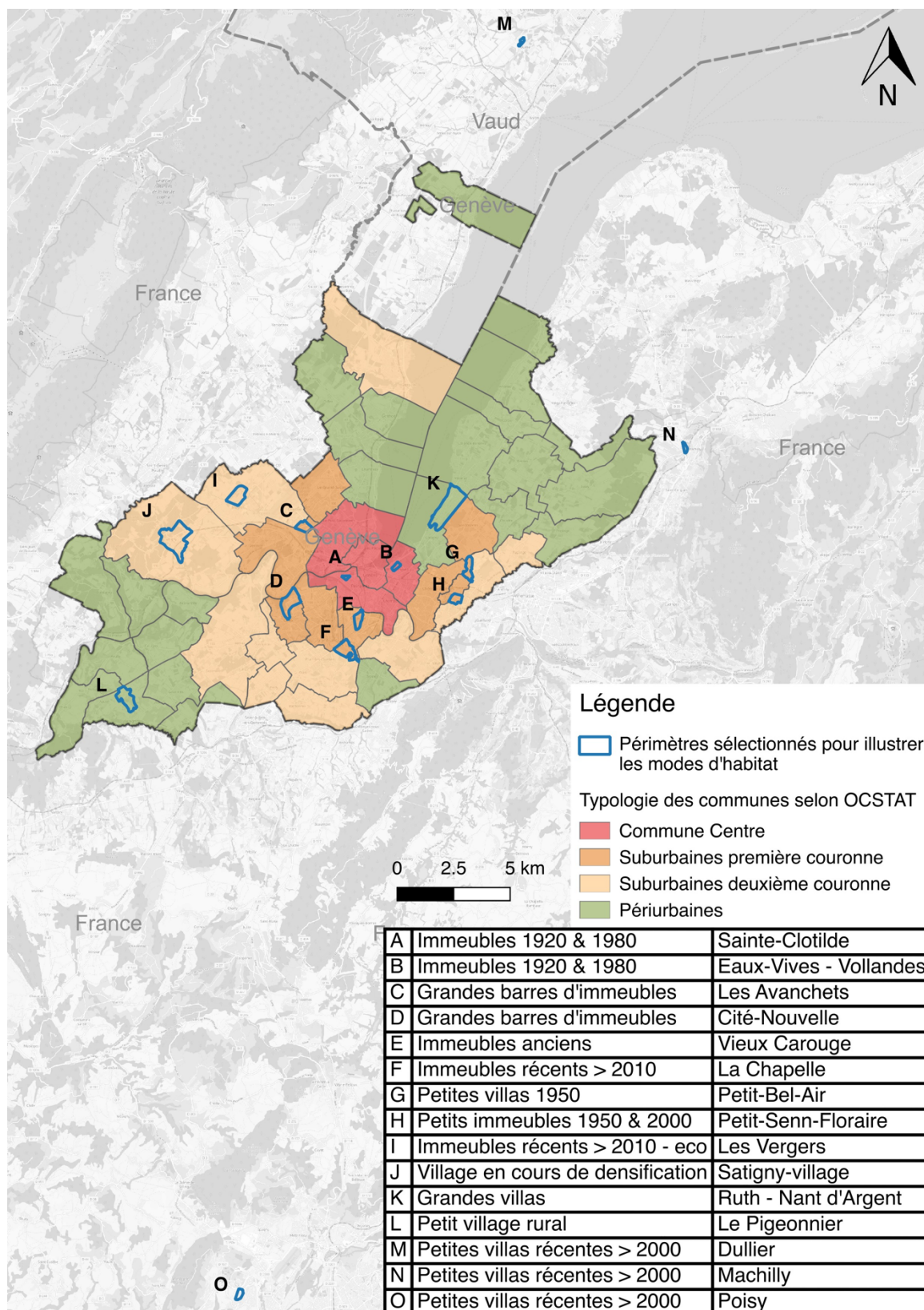


Figure 3. Localisation des périmètres utilisés pour illustrer les modes d'habitat.

4.2 Le logement : caractéristiques déterminantes

Dans le canton de Genève (au quatrième trimestre 2018), parmi les 49'909 bâtiments, 72.5% (36'196) sont à usage d'habitation uniquement, 15.7% (7'826) sont à usage mixte et 11.8% ne sont pas résidentiels. Plus de la moitié (51.4%) des bâtiments sont des maisons individuelles. Ces maisons individuelles n'offrent cependant que 11% des 232'501 logements existants : 89% des logements sont donc des appartements situés dans des immeubles.

La surface par habitant

La surface des logements ainsi que la densité varient fortement selon les périmètres : la surface moyenne par habitant varie tout autant. Au sein du canton, celle-ci varie ainsi entre 30 m² et 69 m² par personne (un facteur 2) pour les modes d'habitat sélectionnés. La qualité de cette estimation de la surface par personne est cependant considérée comme faible bien que basée sur les recommandations de l'OCSTAT¹⁸.

La surface moyenne par habitant influence fortement les calculs de l'impact environnemental puisque les impacts environnementaux de la consommation énergétique et des matériaux du bâti alloués à chaque personne sont calculés au niveau des logements puis attribués à chacun de leurs habitants. À matériaux et consommation énergétique égaux, les habitants du mode K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)) auraient ainsi, par exemple, un impact lié au logement égal au double des habitants du mode C (Grandes barres d'immeubles / Les Avanchets (Vernier)) compte tenu d'une surface quasiment double par personne.

Les types de bâtiment

Il n'existe pas de typologie des bâtiments ni de données sur les matériaux du parc de bâtiments du canton. Basé sur l'étude eREN effectuée par la HES sur les bâtiments du canton de Genève et du canton de Vaud (Schwab et al., 2016), nous faisons ici ressortir, à titre illustratif, quatre types de bâtiments considérés dans ce rapport :

- **Type 1 (1900-1920)** : Bâtiment de 4 à 6 étages en ordre contigu situé en centre-ville. Façade monolithique de grande épaisseur (moellons et briques) recouverte de pierre naturelle apparente. Planchers généralement en bois. Exemple : Eaux-Vives.
- **Type 2 (1945)** : Bâtiment de 5 à 7 étages en ordre contigu situé en centre-ville. Façade monolithique en brique et crépie recouverte de pierre naturelle apparente. Planchers en hourdis ou en béton. Exemple : Jonction.
- **Type 3 (1960-1975)** : Bâtiment de plus de 6 étages en ordre contigu implanté dans les quartiers périphériques des villes. Façade en béton, parfois en préfabriqué. Planchers en béton. Exemple : Onex, Vernier.
- **Type 4 (1980-1990)** : Bâtiment de 4 à 8 étages en ordre non contigu implanté dans les villages. Façade en éléments préfabriqués en béton. Planchers en béton. Exemple : Bernex.

Basés sur les cas d'études, nous rajoutons trois types de bâtiments afin d'illustrer les types de villas et immeubles récents.

- **Type 5 (> 2010)** : Bâtiment Rez + 5 étages moderne. Façade en éléments préfabriqués en béton. Planchers en béton. Exemple : La Chapelle (Lancy).

¹⁸ Voir chapitre 5.3 pour l'analyse de sensibilité et Annexe 1.

- Type 6 (> 2010) : Bâtiment Rez + 5 étages moderne de type Minergie - eco. Façade en béton. Planchers en bois. Exemple : Les Vergers (Meyrin).
- Type 7 (> 2000) : Villa d'un étage moderne. Façade en béton. Planchers en béton. Exemple : Dullier (Vaud).

Selon les données d'une étude menée par l'OCEN (2018) sur les bâtiments de plus de cinq preneurs d'énergie¹⁹ (ci-après immeubles), la moitié (54%, 7356 bâtiments) des immeubles de Genève considérés a été construite avant 1970 dont la moitié (27%, 3657 bâtiments) avant-guerre : un quart des immeubles de Genève est donc de Type 1 et un autre quart de Type 2 ou 3. Le nombre d'immeubles construits chaque décennie après les années 1960 a été décroissant excepté dans les années 1990 qui ont vu se construire environ 15% du parc bâti actuel. Seul 110 immeubles ont été construits entre 2010 et 2015.

L'impact environnemental du bâti est fonction du type et de la quantité des matériaux le constituant (à la construction et en prenant en compte les rénovations ultérieures). L'impact alloué à chaque habitant annuellement dépend ainsi, outre le nombre d'habitants par bâtiment, de la durée de vie de celui-ci : plus la durée de vie est longue, plus l'impact du bâti par année sera faible.

Les bâtiments à Genève ayant, pour la majorité, entre 50 et 120 ans, l'impact environnemental des matériaux peut être considéré comme mineur au regard des impacts considérés selon une perspective de cycle de vie (voir l'état des connaissances ci-dessous et l'Annexe 1 pour plus d'information). Pour cette raison, et à cause du manque d'information sur les types de bâtiment, le bâti est considéré de manière simplifiée dans le cas des dix modes d'habitat basés sur les secteurs statistiques : l'impact des matériaux est considéré comme étant équivalent à 10% de l'impact environnemental induit par leur consommation d'énergie (voir l'état des connaissances ci-dessous pour la justification). Dans le cas des sept modes d'habitat basés sur les cas d'étude, l'impact des matériaux, calculé en se basant sur les plans d'architecte, se situe entre 16% (villas) et 30% (immeubles récents). Ce résultat est conforme aux attentes (voir Annexe 1).

La consommation énergétique

Les données collectées à Genève permettent d'avoir une vision objective de la consommation énergétique des immeubles. D'après OCEN (2018), l'indice moyen de dépense de chaleur (IDC) des immeubles à Genève est de 119 kWh par m² (équivalent à environ 410 MJ par m²) et 58% des immeubles ont un IDC supérieur à cette moyenne. En équivalent mazout, cette consommation correspond à 12 litre/m² an.

Les bâtiments récents (après 1996) ont un IDC moyen inférieur. Ils sont en moyenne 35% meilleurs que les anciens. Les bâtiments rénovés avec haut standard énergétique se situent environ dans la même catégorie que les bâtiments récents mais peu de rénovations lourdes²⁰ ont cependant été effectuées à Genève (moins d'un tiers (27.3%) des bâtiments ont été rénovés).

La différence entre bâtiments anciens rénovés et bâtiments récents est ainsi inférieure à ce que laissent attendre les standards. Les bâtiments peuvent ainsi être classés en deux classes selon leur indice moyen de consommation (IDC) : les anciens (avant l'an 2000) avec un IDC de 490 +/-30 MJ/m² et les nouveaux avec un IDC de 330 +/-15 MJ/m². À surface et énergie équivalentes par personne, les habitants d'un immeuble ancien ont ainsi un impact 50% supérieur aux habitants d'un immeuble récent. Il est à également à noter que les bâtiments de petite taille ont, toute chose égale par ailleurs, un IDC moyen plus important.

¹⁹ Il n'y a pas d'information disponible sur les villas et les bâtiments de moins de cinq preneurs d'énergie.

²⁰ Une rénovation lourde permet un passage en classe efficace (classe A, B ou C).

Concernant les villas, l'évaluation des IDC est plus problématique puisque les données ne sont pas reportées systématiquement. À l'heure actuelle, les bâtiments comportant moins de 5 preneurs de chaleurs (villa et apparentés) sont exemptés du calcul de l'IDC par une pratique administrative (mais pas par la loi). Aucune statistique n'est ainsi disponible dans le rapport de l'OCEN (2018). Les données utilisées dans ce rapport sont ainsi basées sur une moyenne calculée à l'aide des données disponibles issues du SITG ainsi que d'un cas d'étude. L'IDC des villas considérées varie ainsi de 300 à 544 MJ/m².

Les IDC utilisés dans ce rapport pour l'ensemble des modes d'habitat (comprenant des immeubles et des villas) varient ainsi entre 200 MJ/m² et 544 MJ/m² avec une moyenne de 430 MJ/m².

L'impact environnemental de la consommation énergétique est calculé en combinant cette information sur la quantité d'énergie consommée avec une information sur le type d'énergie. À Genève, la grande majorité des surfaces en immeuble (87%) sont chauffées à l'énergie fossile : 44% des surfaces sont chauffées au mazout et 43% au gaz. La majorité des immeubles chauffés au mazout n'ont pas encore été rénovés (leur IDC est donc important). Les villas éloignées du centre, n'ayant pas accès au réseau de distribution du gaz, sont généralement chauffées au mazout hormis en France où une partie d'entre elles (29% en moyenne) est chauffée à l'électricité.

Bien que de nouveaux modes de chauffage voient le jour à Genève (pompe à chaleur (PAC), solaire thermique, chauffage à distance (CAD), etc.), leur proportion est encore faible. Concernant le chauffage à distance, les réseaux de CAD étant reliés, une partie importante de l'énergie provient encore du gaz²¹.

D'après l'OCEN (2018), le mazout et le gaz pour le chauffage sont ainsi responsables de 95% des émissions de gaz à effet de serre du chauffage à Genève (mazout : 57%, gaz : 38%).

Les impacts environnementaux du logement : état des connaissances

Kaenzig et Jolliet (2006) comparent les impacts environnementaux de différents types de bâtiments en Suisse (en écopoints²² par personne par an). Selon Kaenzig et Jolliet (2006), dans un bâtiment traditionnel (construit avant les années 1980), dont la performance thermique est mauvaise, les impacts environnementaux annuels sont principalement (environ 33%) dus à l'utilisation du bâtiment (consommation d'énergie, en particulier pour le chauffage). La part liée à l'électricité est d'environ un tiers également.

La part des impacts liés à la construction du bâtiment, ses matériaux ainsi que sa fin de vie est mineure (15% pour une durée de 50 ans, moitié moins (7.5%) pour une durée de 100 ans)²³. Plus l'isolation est performante (bâtiments après rénovation ou nouveaux standards énergétiques), plus la part des impacts induits par les matériaux devient cependant proportionnellement importante (puisque la part de l'énergie de chauffage et d'électricité consommée diminue). L'intégration des matériaux dans l'analyse des bâtiments récents est ainsi souhaitable et justifie l'utilisation d'une approche différente, par cas d'étude, pour ce type de bâtiment.

Le choix de la source d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire influence fortement l'impact environnemental du logement. À surface équivalente par personne, se chauffer au mazout a, par exemple, un impact environnemental (réchauffement climatique) 30% supérieur au gaz.

²¹ Il peut être considéré que, en moyenne, les émissions sont ainsi équivalentes à 50% de celles du gaz. Source : communication personnelle de SIG.

²² La méthode dite de la « saturation écologique », une méthode de l'Office fédéral de l'environnement synthétisant l'ensemble des charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets (en écopoints ou UBP, Umwelt Belastung Punkten en allemand). Cette méthode suisse a été élaborée en collaboration avec les milieux de la recherche et de l'industrie ainsi que des offices fédéraux (Office fédéral de l'environnement, 2013).

²³ D'où une hypothèse moyenne d'un impact annuel de 10% tel qu'utilisé dans ce rapport.

Une information plus détaillée est fournie en Annexe 1.

4.3 La mobilité pendulaire : caractéristiques déterminantes

La distance parcourue

En 2016, 375'510 emplois (315'610 équivalents plein temps) sont recensés dans le canton de Genève²⁴. Environ 40 à 50 % de ces emplois sont occupés par des navetteurs provenant soit d'un autre canton (environ 30'000) soit de la région frontalière. Les pendulaires intra-cantonaux (actifs résidents du canton de Genève et y travaillant)²⁵ représentent 167'709 personnes (moyenne 2012-2016). S'y ajoutent encore les 9'217 (2016) pendulaires inter-cantonaux sortants²⁶ (87.5% d'entre eux allant dans le canton de Vaud) et à destination de l'étranger.

Les actifs résidant dans le canton de Genève parcourent quotidiennement 6,7 kilomètres en moyenne pour le motif « travail » (Microrecensement, 2015). Les distances parcourues varient cependant fortement selon les individus et selon leur localisation.

Les destinations et origines des pendulaires intra-cantonaux sont représentées dans le Tableau 3 au niveau des zones typologiques (présentées en Figure 4). Le centre offre des emplois à la moitié des habitants du canton (et aux deux tiers des actifs du centre) : il attire par conséquent des habitants du reste du canton (la moitié des habitants de la première couronne, de la deuxième couronne et du périurbain). À l'inverse, un tiers des habitants du centre se déplace vers l'extérieur pour rejoindre leur travail (principalement en première couronne (21%).

La première couronne, quant à elle, offre un cinquième des emplois du canton alors qu'un tiers des actifs y résidant y sont employés. Quant à la deuxième couronne, elle fournit des emplois à environ 10% à 15% de la population cantonale et jusqu'à un quart de sa population (le dernier quart travaillant en première couronne). Le périurbain fournit peu d'emplois, même à ses habitants (15%), le reste travaillant pour un cinquième en première couronne et pour 15% en deuxième couronne.

Destination/Origine	Commune centre	Suburbain 1ère couronne	Suburbain 2ème couronne	Périurbain
Commune centre	66%	50%	47%	51%
Suburbain 1re couronne	21%	33%	26%	21%
Suburbain 2e couronne	10%	14%	24%	13%
Périurbain	3%	3%	3%	15%
Total général	100%	100%	100%	100%

Tableau 3. Destinations et origines des pendulaires intra-cantonaux (en %). Source : OCSTAT T_11.06.2.07 pour les années 2012 à 2016.

²⁴ Statistique cantonale : T_06_02_2_1_02

²⁵ Statistique cantonale : T_11_06_2_06

²⁶ Statistique cantonale : T_11_06_2_03

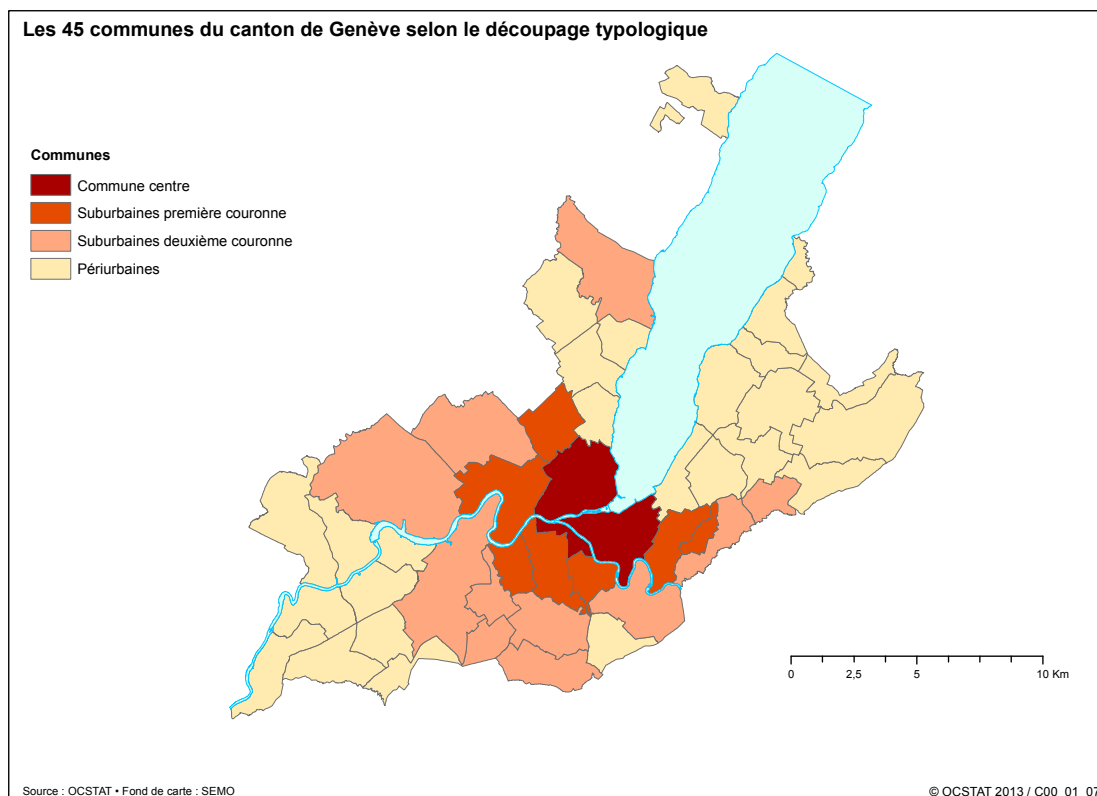


Figure 4. Découpage typologique de Genève. Source : OCSTAT.

Les communes du canton de Genève par zone typologique²⁷ sont :

- Centre : Ville de Genève
- Suburbain 1ère couronne : Carouge, Chêne-Bougeries, Chêne-Bourg, Grand-Saconnex, Lancy, Onex et Vernier.
- Suburbain 2e couronne : Bardonnex, Bernex, Confignon, Meyrin, Perly-Certoux, Plan-les-Ouates, Puplinge, Satigny, Thônex, Versoix et Veyrier.
- Périurbain : Aire-la-Ville, Anières, Avully, Avusy, Bellevue, Cartigny, Céligny, Chancy, Choulex, Collex-Bossy, Collonge-Bellerive, Cologny, Corsier, Dardagny, Genthod, Gy, Hermance, Jussy, Laconnex, Meinier, Pregny-Chambésy, Presinge, Russin, Soral, Troinex et Vandoeuvres.

Les modes de transport

Pour se rendre sur leur lieu de travail, les Genevois privilégient la voiture (30%, dont 27% en tant que conducteur), la marche (24%) et les transports en commun (22%) suivis par les deux-roues motorisés (10%) et le vélo (9%) (OCSTAT, 2012 à 2016).

La situation est cependant différente selon les zones. Les transports collectifs dominent au centre et en 1ère couronne. La moitié (50%) des habitants du centre se rend au travail en transports collectifs et un quart (28%) en TINM (transports individuels non motorisés : marche à pied, vélo, vélo électrique,

²⁷ Il est à noter que la typologie des communes de l'OCSTAT est quelque peu obsolète (Cologny est, par exemple, en périurbain et Bardonnex en deuxième couronne). Il en ressort une des limitations de l'étude.

trottinette, autre). Seuls 17% utilisent leur voiture. Pour les habitants de la première couronne, la part des transports collectifs est équivalente (46%) mais les TINM sont par contre remplacés par la voiture (31%). La voiture domine, en revanche, en deuxième couronne (43%) et en périurbain (51%). Les transports collectifs y représentent tout de même un tiers des trajets (38% en deuxième couronne et 30% en périurbain) et les TINM y comptent pour 11% des trajets. La part des deux-roues motorisés est similaire pour les habitants de toutes les zones (6 à 9%). Source : OCSTAT (2012 à 2016).

Les navetteurs inter-cantonaux sortants (non représentés dans le Tableau 3) prennent, quant à eux, principalement le train (45%) et la voiture (31%).

L'impact environnemental de la mobilité pendulaire est ainsi estimé en considérant les informations sur les distances moyennes parcourues par habitant²⁸ pour le motif de travail (par zone typologique, voir Annexe 2)²⁹ pour chacun des modes de transport. L'infrastructure et les véhicules (construction et fin de vie) sont considérés de manière générique, par mode de transport, basé sur des moyennes suisses.

Les impacts environnementaux de la mobilité : état des connaissances

Kaenzig et Jolliet (2006) comparent les impacts environnementaux de différents moyens de transport en Suisse (en écopoints³⁰ par personne par an). Selon eux la variabilité de l'impact environnemental est grande entre les moyens de transport (un facteur sept), allant de 40 écopoints pour une personne se déplaçant en train régional, 70 écopoints lors d'un transport en tram ou trolleybus et jusqu'à 290 écopoints pour une personne se déplaçant seule en voiture.

La majorité des impacts environnementaux de la mobilité a lieu durant la phase d'utilisation : la combustion du carburant est, par exemple, responsable d'environ deux-tiers des impacts dans le cas d'une voiture. L'infrastructure a également une contribution significative (environ 20% pour la route et jusqu'à la moitié des impacts pour le rail) tandis que le véhicule (fabrication, entretien et fin de vie) a une contribution plus faible. Dans ce rapport, l'impact des véhicules et des infrastructures est considéré de manière générique, en se basant sur les moyennes suisses (taux de remplissage, durées de vie moyenne par modes de transport).

L'impact de la mobilité pendulaire est ainsi principalement lié à la phase d'utilisation ainsi qu'à l'infrastructure (et moins à l'impact environnemental lié à la fabrication et fin de vie des véhicules). Le nombre de voitures par ménage influence principalement cet impact par le fait qu'un plus grand nombre de voitures augmente la propension à utiliser ce mode de transport plutôt qu'un autre. La surface de route par personne peut également avoir de l'importance (particulièrement dans le cas de surfaces privées)³¹. Il est ainsi estimé qu'une portion de chaussée d'un mètre carré (1 m²) de bitume équivaut, pour ce qui est du réchauffement climatique, à 1000 km parcourus individuellement en voiture. Un chemin privé de 16 m² correspond ainsi à une année (en comparaison avec la moyenne suisse) de déplacements en voiture³².

Une information plus détaillée est fournie en Annexe 2.

²⁸ Une moyenne considérant toute la population (active et non) est prise en compte.

²⁹ Source : Office Cantonal des transports selon les données du Microrecensement 2015 (OFS/ARE). Ces données sont légèrement différentes des données publiées par l'OCSTAT.

³⁰ Voir note 18.

³¹ Cet aspect est fourni à titre illustratif mais n'est pas considéré dans ce rapport.

³² La mobilité quotidienne est, en moyenne, égale à 15'593 km par an. Source : Microrecensement mobilité et transports 2015.

5 Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie

L'impact environnemental des modes d'habitat est représenté à l'aide de l'indicateur de réchauffement climatique (en kg de CO₂-équivalent par personne par an).

5.1 Analyse des contributions du logement et de la mobilité pendulaire

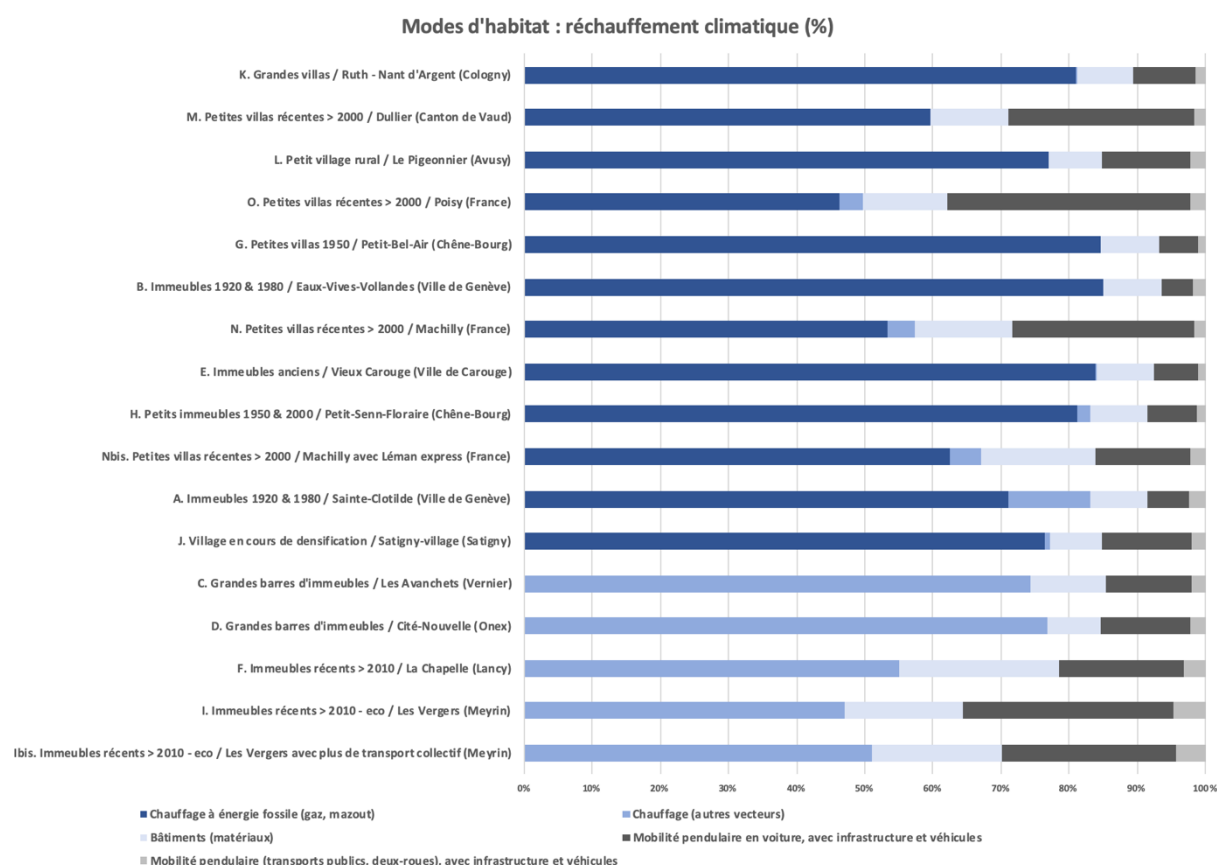


Figure 5. Contribution (en %) du logement et de la mobilité pendulaire au réchauffement climatique par personne par an.

L'impact environnemental de chacun des modes d'habitat³³ est dominé par le logement : de 64% dans le cas du mode I (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers (Meyrin)) à 94% dans le cas du mode B (Immeubles 1920 et 1980 - Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)). L'impact environnemental du chauffage et de l'eau chaude sanitaire est dominant dans le logement : entre 70% dans le cas du mode F (Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)) et 91% dans le cas des modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques (par définition). Cet impact est largement dominé par les énergies fossiles (gaz et mazout). L'impact environnemental du bâti (matériaux de construction) est, quant à lui, mineur : entre 9% dans le cas des modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques (par définition) et 30% dans le cas du mode F (Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)).

³³ Tels que définis dans ce rapport.

L'impact environnemental de la mobilité pendulaire est largement dominé par les trajets en voiture (entre 72% dans le cas du mode B (Immeubles 1920 et 1980 / Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)) et 94% dans le cas du mode O (Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France)). Cet impact est dominé par la phase d'utilisation (plus de 60%). Viennent ensuite l'impact de l'infrastructure et celui des véhicules.

Ces résultats sont conformes aux attentes. En effet, en moyennes suisses, le logement et la mobilité individuelle comptent chacun pour environ un quart de l'impact environnemental annuel d'un habitant. Étant donné que **seule la mobilité pendulaire est ici considérée**, et que celle-ci représente 14% des distances parcourues en moyenne par un Genevois par année, un rapport de 1 à 7 (18% en moyenne dans ce rapport) entre les impacts du logement et de la mobilité pendulaire sont attendus en moyenne.

5.2 Comparaison de l'impact environnemental des modes d'habitat

Les résultats par mode d'habitat (comprenant le logement et la mobilité pendulaire) sont présentés en Figure 6 et dans le Tableau 4 ci-dessous.

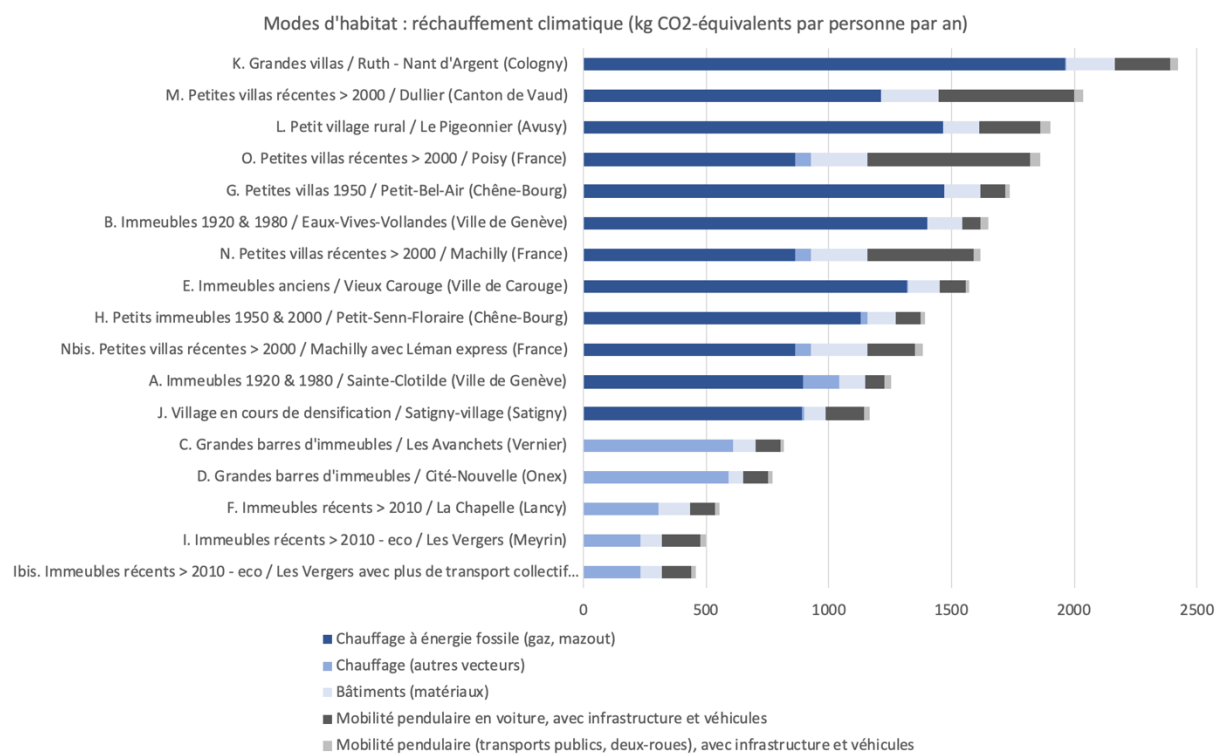


Figure 6. Résultats par mode d'habitat (logement et mobilité pendulaire) (en kg de CO₂-équivalent par personne par an).

#. Nom (Commune)	Logement (kg CO2-e/an)			Mobilité pendu- laire (kg CO2-e/an)		Logement		Mobilité pendulaire		Total	
	Chauffage		Bâtiments	Voiture	Autres	kg CO2-e/an	%	kg CO2-e/an	%	kg CO2-e/an	Proportions
	Gaz, mazout	Autres									
Ibis. Immeubles récents > 2010 - eco Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)	0	234	87	117	20	321	70%	137	30%	458	1.0
I. Immeubles récents > 2010 - eco Les Vergers (Meyrin)	0	234	87	154	23	321	64%	177	36%	498	1.1
F. Immeubles récents > 2010 La Chapelle (Lancy)	0	306	130	102	17	436	79%	119	21%	555	1.2
D. Grandes barres d'immeubles Cité-Nouvelle (Onex)	0	593	59	102	17	652	85%	119	15%	771	1.7
C. Grandes barres d'immeubles Les Avanchets (Vernier)	0	609	91	102	17	700	85%	119	15%	819	1.8
J. Village en cours de densification Satigny-village (Satigny)	892	7	90	154	23	989	85%	177	15%	1166	2.5
A. Immeubles 1920 & 1980 Sainte-Clotilde (Ville de Genève)	893	151	104	77	30	1148	91%	107	9%	1255	2.7
Nbis. Petites villas récentes > 2000 Machilly avec Léman express (France)	927	0	232	191	31	1159	84%	222	16%	1381	3.0
H. Petits immeubles 1950 & 2000 Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)	1129	28	116	102	17	1273	91%	119	9%	1392	3.0
E. Immeubles anciens Vieux Carouge (Ville de Carouge)	1319	3	132	102	17	1454	92%	119	8%	1573	3.4
N. Petites villas récentes > 2000 Machilly (France)	927	0	232	431	27	1159	72%	458	28%	1617	3.5
B. Immeubles 1920 & 1980 Eaux-Vives-Vollandes (Ville de Genève)	1402	0	140	77	30	1542	94%	107	6%	1649	3.6
G. Petites villas 1950 Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)	1471	1	147	102	17	1619	93%	119	7%	1738	3.8
O. Petites villas récentes > 2000 Poisy (France)	927	0	232	663	41	1159	62%	704	38%	1863	4.1
L. Petit village rural Le Pigeonnier (Avusy)	1466	0	147	249	41	1613	85%	290	15%	1903	4.2
M. Petites villas récentes > 2000 Dullier (Canton de Vaud)	1214	0	232	556	34	1446	71%	590	29%	2036	4.4
K. Grandes villas Ruth - Nant d'Argent (Cologny)	1962	6	197	224	33	2165	89%	257	11%	2422	5.3

Tableau 4. Résultats par mode d'habitat (en kg de CO2-équivalent par personne par an).

Comme indiqué ci-dessus, les énergies fossiles (51% en moyenne) et la mobilité pendulaire en voiture (16% en moyenne) dominent l'impact environnemental de tous les modes d'habitat. Il existe cependant une différence notable entre ceux-ci.

Le mode d'habitat avec la meilleure performance environnementale est le mode d'habitat Ibis (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)) tandis que la pire performance peut être observée pour le mode habitat K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)), **environ cinq fois plus élevée.**

La bonne performance du mode d'habitat Ibis (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)) est expliquée par une part élevée d'énergie non-fossile (raccordement au CAD), une surface moyenne par personne faible (30-36 m²) dans des immeubles récents avec un standard énergétique élevé (IDC : 200 MJ/m²). Elle est aussi expliquée par des distances de mobilité pendulaire limitées et une utilisation conséquente des transports publics (44%).

La mauvaise performance du mode d'habitat K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)) est expliquée par les arguments inverses : une utilisation importante d'énergie fossile (mazout), une surface habitée par personne la plus élevée (69 m²) et un IDC : 437 MJ/m². Elle est aussi expliquée par une plus grande distance au lieu de travail et une utilisation plus importante de la voiture (57%).

Il semble possible de classer les modes d'habitat en quatre groupes distincts :

- **Un premier groupe de modes d'habitat (émissions : 0.4 – 0.8 tonne de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par des surfaces réduites par personne (< 36 m²) et un chauffage sans énergie fossile. Il comprend les immeubles récents (Ibis. Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin), I. Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers (Meyrin), et F. Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)) et les grandes barres d'immeubles chauffées au CAD (D. Grandes barres d'immeubles / Cité-Nouvelle (Onex), et C. Grandes barres d'immeubles / Les Avanchets (Vernier)).
- **Un deuxième groupe de modes d'habitat (émissions : 1.2 – 1.4 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par des surfaces réduites par personne (< 38 m²) et un chauffage à dominante gaz ou un chauffage partiellement à l'électricité avec des surfaces plus grandes. Il comprend les modes d'habitat J (Village en cours de densification / Satigny-village (Satigny)), A (Immeubles 1920 & 1980 / Sainte-Clotilde (Ville de Genève)), Nbis (Petites villas récentes > 2000 / Machilly avec Léman express (France)) et H (Petits immeubles 1950 & 2000 / Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)).
- **Un troisième groupe de modes d'habitat (émissions : 1.5 – 1.7 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par un élément avec grand impact : soit une consommation d'énergie importante, un chauffage à dominante mazout ou de longues distances parcourues en voiture pour la mobilité pendulaire. Il comprend des petites villas récentes ou non (N. Petites villas récentes > 2000 / Machilly (France) et G. Petites villas 1950 / Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg) et des immeubles (B. Immeubles 1920 & 1980 / Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)).
- **Un quatrième groupe de modes d'habitat (émissions : 1.9 – 2.4 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** est caractérisé par deux ou plusieurs aspects à grand impact : une grande consommation énergétique, un chauffage à dominante mazout ou de longues distances parcourues en voiture. Il comprend des villas (O. Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France), M. Petites villas récentes > 2000 / Dullier (Canton de Vaud), et K. Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)) ainsi que des habitations villageoises (L. Petit village rural / Le Pigeonnier (Avusy)).

A titre de comparaison, l'OFEV estime que les **émissions sur le territoire suisse** (sans inclure le transport aérien international) étaient de **5.6 tonnes de CO₂-équivalent par personne et par an en 2017 et de 14 t.CO₂-éq/pers/an selon une approche orientée « consommation »**, c'est-à-dire considérant l'ensemble des émissions induites par une personne durant une année pour satisfaire son mode de vie, où que celles-ci aient lieu dans le monde. Le Conseil fédéral a décidé en août 2019 que la Suisse réduira à zéro ses émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050³⁴. D'après l'OFEV, le seuil correspondant aux limites planétaires serait de 1 à 1,5 t.CO₂-éq/pers/an d'ici à 2050 et 0.6 t.CO₂-éq/pers/an d'ici la fin du siècle³⁵.

³⁴ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/objectif-climat2050.html>

³⁵ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/en-bref.html#-1333200555>

Facteurs-clés de performance pour le volet logement

Les différences d'impact pour le logement s'expliquent principalement par trois facteurs :

- La surface habitée par personne
- La consommation énergétique par m² de surface habitée
- Le vecteur énergétique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

La consommation énergétique par personne varie d'un facteur quatre entre les modes d'habitat, tandis que l'impact entre vecteurs énergétiques varie, en moyenne dans ce rapport, d'un facteur deux.

Facteurs-clés de performance pour le volet mobilité pendulaire

En matière de mobilité pendulaire, tant la distribution entre les modes de transport que la distance parcourue pour le travail jouent un rôle. Les habitants du mode d'habitat O (Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France)) effectuent ainsi, en moyenne, un trajet trois fois plus long que les habitants du mode d'habitat B (Immeubles 1920 & 1980 / Eaux-Vives - Vollandes (Ville de Genève)) : 11.7 km versus 3.9 km par jour.

Ainsi, un **facteur sept est observé entre les impacts de la mobilité** pendulaire des habitants du centre (107 kg de CO₂-équivalent par personne par an) et ceux du périurbain (704 kg de CO₂-équivalent par personne par an).

Mode	Centre	Première couronne	Deuxième couronne	Périurbain	Nyon - agglo	France proche	France proche CEVA	France lointain
Voiture	77	102	154	224	556	431	249	663
Transport collectif	17	6	9	14	29	4	15	7
Autres	13	11	14	19	5	22	26	34
Total	107	119	177	257	590	458	290	704

Tableau 5. Mobilité pendulaire : émissions de Gaz à effet de serre (kg CO₂-équivalent par personne par an) par mode de transport selon le lieu d'habitation par zone typologique du canton de Genève, Vaud (Nyon - agglo) et la France.

5.3 Analyses de sensibilité

Les trois aspects les plus critiques de la modélisation sont la surface par personne, les distances parcourues et les modes de transport.

Surface par personne

L'utilisation des données (T 09.02.3.2.02) fournies par l'Office cantonal de la statistique (OCSTAT) permet de calculer la surface de logements par commune. En la combinant avec la population par commune, il est possible de calculer la surface moyenne occupée par personne par commune.

La comparaison entre ces valeurs calculées au niveau communal et l'approche choisie dans ce rapport montre que les différences sont faibles (9% en moyenne) pour la majeure partie des modes d'habitat mais les différences du mode J (Village en cours de densification / Satigny-Village (Satigny)) (39%) et du mode A (Immeubles 1920 et 1980 / Sainte-Clotilde (Ville de Genève)) (21%) sont importantes. Dans les deux cas, cette différence pourrait être expliquée par la taille et la diversité de ces communes mais rien ne le prouve.

Concernant les surfaces des petites villas récentes, les données sont basées sur un seul cas d'étude. La valeur par habitant étant parmi les plus importantes des modes d'habitat (45 m²), il est probable que de

plus amples informations tendraient à faire diminuer cette valeur, et donc à réduire les impacts par personne. Il convient cependant de noter qu'une diminution du nombre d'habitant par villa (deux au lieu de quatre par exemple) aurait tendance, au contraire à faire augmenter l'impact du au chauffage.

Les valeurs que nous proposons ici peuvent ainsi, à notre avis, être considérées comme suffisamment représentatives pour l'analyse proposée dans ce rapport compte tenu des données existantes.

Distance parcourue et modes de transport

Les distances parcourues quotidiennement pour un motif de travail, tout comme les modes de transports utilisés, peuvent fortement varier entre individus.

Une utilisation plus importante de transports publics comme dans le cas du mode d'habitat Ibis (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)) permet ainsi, par exemple, de réduire d'environ 10% les impacts par rapport au mode d'habitat I (Immeubles récents > 2010 - eco / Les Vergers (Meyrin)). Dans le cas du mode d'habitat Nbis (Petites villas récentes > 2000 / Machilly avec Léman express (France)), la réduction pourrait même être de 15% par rapport au mode d'habitat sans Léman express (N. Petites villas récentes > 2000 / Machilly (France)).

Les impacts induits par les trajets en voiture pourraient également varier suite à une meilleure prise en considération des différents types de véhicule. Une meilleure considération des véhicules de grande taille (au lieu de véhicules de taille moyenne comme c'est le cas actuellement) augmenterait de manière significative la part de la mobilité pendulaire dans les cas où elle est déjà importante (un facteur deux à trois potentiellement). L'impact du type de motorisation (par exemple électrique) serait également à considérer compte tenu des changements à venir dans ce domaine.

Dans le cas de l'impact d'un individu spécifique (par exemple un actif habitant à 50 km de Genève et venant seul en voiture de grande taille travailler à Genève), la mobilité deviendrait dominante (environ 7.5 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an pour une distance de transport de 24'000 km).

L'impact des transports publics est également susceptible de varier avec une meilleure prise en considération du type de moyen de transport. En effet, les résultats sont actuellement calculés avec les facteurs d'impact du tramway. L'impact du bus étant environ quatre fois supérieur, les modes d'habitat pour lesquels il n'existe pas de tramway/trolleybus pourraient ainsi voir leur impact lié aux transports publics multipliés par trois. Une meilleure prise en considération de cet aspect aurait ainsi, par conséquent, tendance à augmenter la différence entre les modes d'habitat proches du centre et desservis par le tram ou les trolleys et les autres modes d'habitat desservis uniquement par bus conventionnels (particulièrement ceux qui ont déjà le plus d'impact, p. ex. le mode K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologne)) et le mode L (Petit village rural / Le Pigeonnier (Avusy)). Cet aspect mériterait d'être approfondi dans une phase ultérieure, bien que le classement entre modes d'habitat n'en serait, à priori et compte tenu de la contribution réduite des transports publics à l'impact calculé dans ce rapport, que peu modifié. Concernant l'impact du train régional (tel que le Léman express), celui ayant un impact environ deux fois inférieur au tramway, l'impact des transports public serait réduit d'autant (mode Nbis (Petites villas récentes > 2000 / Machilly avec Léman express (France))).

Mobilité pendulaire vs. mobilité quotidienne

Pour rappel, cette étude ne considère que la mobilité pendulaire (pour se rendre du domicile au lieu de travail). Les autres motifs de mobilité (p.ex. loisirs) ne sont donc pas considérés dans la mesure où leur modélisation est plus indirectement liée au mode d'habitat.

La prise en considération d'une définition plus large des transports incluant l'ensemble de la mobilité quotidienne (éducation, achats, loisirs...) aurait pour conséquence d'augmenter les distances parcourues et de modifier la distribution entre les modes de transport. Le cas échéant, l'augmentation de l'impact

environnemental est présentée dans le Tableau 6 pour les modes d'habitat situés en Suisse. L'impact induit par la mobilité augmenterait d'un facteur 10 environ pour les habitants du canton de Genève et d'un facteur 4 pour les habitants de la région de Nyon (Dullier).

L'impact induit par la mobilité serait ainsi supérieur à celui induit par le logement dans bien des cas. Le classement des modes d'habitat serait modifié et la différence entre les modes d'habitat serait réduite (facteur deux au lieu d'un facteur cinq).

Mode	Centre	Première couronne	Deuxième couronne	Périurbain	Nyon - agglo
Voiture	944	1188	1634	2681	2415
Transport collectif	97	58	69	212	82
Autres	32	27	43	59	27
Total	1073	1274	1746	2952	2523

Tableau 6. Mobilité quotidienne : émissions de Gaz à effet de serre (kg CO₂-équivalent par personne par an) par mode de transport selon le lieu d'habitation par zone typologique du canton de Genève, Vaud (Nyon - agglo) et la France.

6 Limites de l'étude

Ce rapport présente une évaluation basée sur les données disponibles dans les statistiques et les études, complétées avec quelques données obtenues à partir de bâtiments spécifiques. Les résultats sont conformes aux attentes mais certaines limites sont à relever.

6.1 Le logement

Les statistiques de logement à Genève concernant les surfaces et les IDC ont été effectuées sur des échantillonnages et ne sont donc pas exhaustifs. Leur fiabilité est inégale entre les communes et les sous-secteurs. Les résultats pour les modes d'habitat J (Village en cours de densification / Satigny-Village (Satigny)) et H (Petits immeubles 1950 & 2000 / Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)) laissent à penser qu'un biais statistique pourrait être présent (surfaces calculées trop faibles). Comme mentionné au Chapitre 4.2, ces surfaces influencent grandement le résultat final. L'IDC est, de plus, mal renseigné au niveau des villas. Cependant, celui-ci restant dans l'ordre de grandeur établi au niveau de la Suisse/Genève, il est fait l'hypothèse que la marge d'erreur est relativement faible. Une discussion est souhaitable avec les services concernés pour mieux comprendre si, et comment, ces données pourraient être fiabilisées.

La modélisation de l'impact des matériaux est basée sur une forte approximation pour les dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques. Cette approximation est cependant tout à fait acceptable car conforme aux données de la littérature qui montre l'impact limité de ceux-ci selon une perspective cycle de vie. La modélisation plus précise basée sur les cas d'étude confirme également ce fait puisque conforme aux résultats de la littérature.

6.2 La mobilité pendulaire

Dans le canton de Genève et de Vaud, les comportements moyens (distances parcourues et modes de transport utilisés (parts modales)) sont basés sur les données statistiquement représentatives les plus fines possible. Cette représentativité n'est cependant possible qu'à l'échelle des zones typologiques (et non des communes ou des sous-secteurs). Disposer d'informations aux niveaux des communes ou des sous-secteurs serait possible avec une approche basée sur des scénarios (considérant si possible les facteurs explicatifs du choix de mobilité, comme par exemple la disponibilité de places de stationnement au lieu de domicile et de travail) plutôt que sur des statistiques. Il est à noter que la modélisation de la mobilité pendulaire des modes d'habitat situés en France pourrait également être améliorée.

La construction d'une image cohérente au niveau genevois demanderait ainsi l'amélioration de la modélisation de la mobilité pendulaire en exploitant les données cantonales disponibles (par exemple la distance parcourue annuellement sur Genève en transport public), plus de données du microrecensement, ainsi que les informations disponibles auprès de l'Office cantonal des véhicules (OCV) sur le parc automobile ou des informations sur le taux de remplissage des transports publics.

7 Conclusion et perspectives

Cette étude pose les bases méthodologiques permettant d'évaluer l'impact environnemental d'une sélection de modes d'habitat existants actuellement dans l'agglomération du Grand Genève. Les premiers résultats permettent d'identifier les facteurs clés des impacts environnementaux et déterminer les besoins supplémentaires pour disposer d'une méthode robuste et qui puisse être répliquée.

D'un point de vue méthodologique, **le logement et la mobilité pendulaire sont considérés de manière adéquate**. Certaines données, peu robustes, demanderaient cependant un approfondissement (p. ex. les surfaces par habitant ou les IDC des zones villas).

Les modes d'habitat peuvent être classés en quatre groupes dont les deux extrêmes diffèrent d'un facteur cinq (0.46 tonnes de CO₂-équivalent versus 2.2 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an) :

- Le mode Ibis (Immeubles récents > 2010 – eco / Les Vergers avec plus de transport collectif (Meyrin)), aux impacts modérés grâce à une surface de logement par personne réduite, une quantité réduite d'énergie pour un chauffage basé sur le CAD, et une forte utilisation des transports publics.
- Le mode K (Grandes villas / Ruth - Nant d'Argent (Cologny)) aux impacts significatifs à cause d'une surface de logement par personne importante, une utilisation importante d'énergie fossile pour se chauffer et de plus longues distances parcourues en voiture.

Les impacts liés au logement, induits par la consommation d'énergie fossile pour le chauffage, dominent les résultats moyens pour chaque mode d'habitat. Les impacts liés à la mobilité pendulaire viennent ensuite, dominés par les impacts liés à l'utilisation de la voiture.

Bien que les messages soient clairs, les limites constatées (certaines données étant de qualité moyenne) ainsi que l'importance des comportements individuels en matière de mobilité mériteraient de croiser ces résultats avec des études complémentaires, par exemple comportementales dans le domaine des transports, pour permettre leur utilisation dans la prise de décision.

7.1 Réponse aux hypothèses de travail

Quatorze hypothèses de travail ont été proposées par le groupe de suivi. Une réponse aux huit hypothèses retenues avec le groupe de travail est proposée ci-dessous.

1. La localisation des modes d'habitat influence la mobilité et partant la consommation de ressources naturelles.

Oui. Deux aspects de la mobilité sont influencés par la localisation : la distance au lieu de travail et la distribution entre les modes de transport. L'impact de la voiture domine largement l'impact des autres modes de transport.

2. La densité des modes d'habitat influence la consommation énergétique, de sol, la biodiversité, la quantité et la qualité des espaces verts.

Probablement. Ce rapport ne peut cependant apporter une réponse quantifiée à cette question. Une étude plus approfondie (et spécifique à des cas concrets) est nécessaire.

3. Les modes d'habitat influencent le tissu bâti et donc les espaces verts et la biodiversité.

Probablement. Ce rapport ne peut cependant déterminer quel mode d'habitat est le meilleur puisque la bonne échelle de mesure de la biodiversité et de la quantité d'espace vert ne peut être actuellement définie (importance au niveau d'un îlot, d'un quartier ou du canton ?).

4. Les modes d'habitat influencent les ressources mobilisées pour la construction.

Oui. Plus un bâtiment est récent, plus l'impact des ressources pour la construction est proportionnellement important par rapport à l'impact induit par la consommation énergétique.

5. Une même densité bâtie peut avoir divers impacts environnementaux (selon le tissu bâti, le mode de construction, l'éloignement du centre-ville, etc.).

Oui. Les aspects environnementaux principaux d'un mode habitat sont liés au type d'énergie utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire ainsi qu'à la distance aux emplois. L'utilisation d'énergies non-fossiles et la minimisation des trajets pendulaires en voiture doivent être privilégiés.

8. La mobilité générée par l'habitat des zones à faible densité, excentrées et mal desservies par les TP, a des impacts environnementaux et sur la santé des habitants au-delà desdites zones.

Oui. Bien que cela ne le soit pas directement montré dans le rapport, les impacts de la mobilité individuelle ont lieu tout au long du trajet lié à cette mobilité. Les impacts principaux sur la santé humaine découlent de l'émission de particules fines.

9. Il existe un potentiel important de réduction de l'impact environnemental et de gain de qualité (environnement, biologie, bruit, air, santé) dans les zones centrales bien desservies par les TP et la MD par la limitation de la circulation automobile venant de l'extérieur (meilleure qualité de l'air, nouvelles possibilités d'arborisation, gain en espaces verts et publics sur les espaces de stationnement, etc.).

Oui. Bien que cela ne le soit pas directement montré dans le rapport, la limitation de la circulation automobile dans les zones denses réduit les atteintes à la santé humaine (voir question 8).

13. Les choix des matériaux de construction et des systèmes énergétiques ont un impact sur l'environnement.

Oui. Le choix des systèmes énergétiques est de tout premier plan. Le choix des matériaux de construction est déterminant pour réduire la consommation énergétique. Cela prime sur l'augmentation de l'impact induit par ces matériaux eux-mêmes, à condition que la durée de vie des bâtiments soit suffisamment importante.

7.2 Perspectives

Les résultats fournis dans cette étude sont une première étape riche d'enseignements et qui démontre la pertinence d'utiliser l'outil d'Analyse de Cycle de Vie pour comparer l'impact environnemental de différents modes d'habitat.

La méthodologie proposée dans ce rapport ouvre les perspectives suivantes :

- L'application de la méthode à des cas spécifiques **d'aide à la décision** pour prendre en compte les objectifs climatiques dans les planifications territoriales (p. ex. densité requise ou taux de report modal minimal d'un quartier par rapport à des objectifs supérieurs, tels que ceux du Plan climat cantonal) est possible moyennant quelques développements supplémentaires.
- L'application de la méthode pour une **cartographie de l'ensemble du canton de Genève** (ou à une nouvelle série de quartiers ou secteurs géographiques) est possible mais requière cependant des développements supplémentaires pour affiner les données³⁶. Cette extrapolation permettrait d'évaluer l'étendue et la répartition des modes d'habitat à l'échelle cantonale ou

³⁶ En effet, dans le cas de tissu urbain hétérogène ou en mutation avec de nombreux bâtiments récents, les données statistiques sont parfois incomplètes (population, IDC, etc.) et les distances de transport (ainsi que les modes de transport) à déterminer.

encore d'effectuer un diagnostic plus poussé de l'effet des évolutions à venir (Genilac, Leman Express) pour identifier les secteurs où de nouvelles mesures devraient être prises.

- La modélisation développée pour effectuer l'ACV de bâtiments réels (cas F, I, Ibis, M, N, Nbis et O) mériterait d'être valorisée pour **vulgariser l'impact des choix architecturaux en termes de choix de matériaux ou énergétiques**. En effet, bien qu'il existe, de nombreux instruments à l'intention des maîtres d'ouvrage tels que les eco-devis, les eco-CFC et les données des écobilans (plateforme eco-bau)³⁷, des recueils de bonnes pratiques (plateforme "Bilan carbone chantier et bâtiment")³⁸, ainsi que des outils de modélisation (tels que Eco-Bat), il n'existe pas à ce jour de document public offrant une comparaison synthétique entre les impacts des différents types de bâtiments³⁹.

D'un point de vue méthodologique, le logement et la mobilité pendulaire sont considérés de manière adéquate. Néanmoins, **l'amélioration de la robustesse du modèle** (fiabilité et granulométrie des données) **est souhaitable**. Ce travail doit se faire en collaboration avec les services spécialisés puisque les données ne sont actuellement pas disponibles dans le domaine public :

- Surface habitée des logements : affinage des méthodes statistiques (OU/OCSTAT) ;
- Chaleur : exploitation des données finales de l'étude IDC et compléments de données à obtenir pour les villas (OCEN) ;
- Distances et modes de transport au niveau des communes/sous-secteurs : génération de données plus précises que celles disponibles dans le Microrecensement (limité aux zones typologiques) et développement de scénarios spécifiques (p. ex. comparaison entre 2 comportements de navetteurs plutôt qu'en utilisant les données de mobilité pendulaire moyennées de l'ensemble de la population), en considérant si possible les facteurs explicatifs du choix de mobilité, comme par exemple la disponibilité de places de stationnement au lieu de domicile et de travail. L'intégration des déplacements pour d'autres motifs serait également intéressante (OCT).

Il est également **souhaitable de mieux comprendre si, et comment, les aspects liés à la biodiversité pourraient être intégrés**. Une étude complémentaire au présent rapport est prévue en collaboration avec l'UNIGE.

De plus, **une comparaison avec les études existantes** du canton de Genève, telle que le Bilan Carbone du canton de Genève, serait certainement bénéfique dans une logique d'intégration des actions aux différentes échelles.

³⁷ www.eco-bau.ch

³⁸ <https://maneco-exp.izypeo.net/login>

³⁹ Des publications récentes de l'EPFL mettent d'ailleurs en évidence le manque d'intégration des outils d'ACV par les maîtres d'ouvrages et les architectes (p.ex. <https://infoscience.epfl.ch/record/271500?ln=en>)

8 Références

Département du territoire (2006). Directive pour le calcul de l'indice de dépense de chaleur, Énergétique du bâtiment.

Heeren et al. (2015). "Environmental Impacts of Buildings – What Matters?" in Environ. Sci. Technol.

Jolliet et al. (2018). Analyse du cycle de vie. PPUR.

Kaenzig J., Jolliet O. (2006). « Consommation respectueuse de l'environnement : décisions et acteurs clés, modèles de consommation » in Connaissance de l'environnement no 0616. Office fédéral de l'environnement. Berne.

Kaufmann V., Munafo S. (2014). La mobilité des Genevois et des Vaudois, rapport de synthèse. Lausanne EPFL, LaSUR.

KBOB (2016). Recommandation de la KBOB « Données des écobilans dans la construction 2009/1:2016 ».

OCEN (2018). La consommation de chaleur des bâtiments de Genève.

Office cantonal de la statistique (2014). Microrecensement de la mobilité et des transports.

Office fédéral de l'environnement (2013). Ecofacteurs suisses 2013 selon la méthode de la saturation écologique.

Schwab et al. (2016). Rénovation Énergétique. Approche globale pour l'enveloppe du bâtiment.

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie (OFEN) (2018). L'efficacité énergétique dans les ménages.

9 Annexe 1. Modélisation du logement

Un état des connaissances sur les impacts environnementaux du logement est tout d'abord présenté. Cette annexe comporte ensuite les informations complémentaires concernant la modélisation du logement pour les dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques ainsi que pour les cas d'étude.

9.1 Les impacts environnementaux du logement : état des connaissances

L'impact environnemental du logement est ici évalué en considérant le bâti (construction et fin de vie des matériaux) ainsi que la consommation d'énergie durant la phase d'utilisation pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.

Kaenzig et Jolliet (2006) comparent les sources de l'impact environnemental de différents bâtiments en Suisse (en milliers d'écopoints par personne par an – la surface est différente par personne : 44 m² pour les deux première colonnes, 69 m² pour les suivantes).

En moyenne, un tiers de l'impact est dû au chauffage et à l'eau chaude sanitaire (ici au gaz naturel), un tiers à la consommation d'électricité et 15% aux matériaux et à la construction.

Dans un bâtiment Minergie, l'impact environnemental des matériaux passe à un peu plus d'un tiers celui de l'électricité à un autre tiers et celui du chauffage et de l'eau chaude sanitaire à quelques pourcents uniquement. L'isolation est ainsi le facteur clé permettant de réduire l'impact environnemental d'un bâtiment.

Une comparaison par m² habité montre ainsi qu'un bâtiment traditionnel a deux fois plus d'impact au m² qu'un bâtiment SIA basé sur les valeurs limites, et environ 60% de plus qu'un bâtiment Minergie.

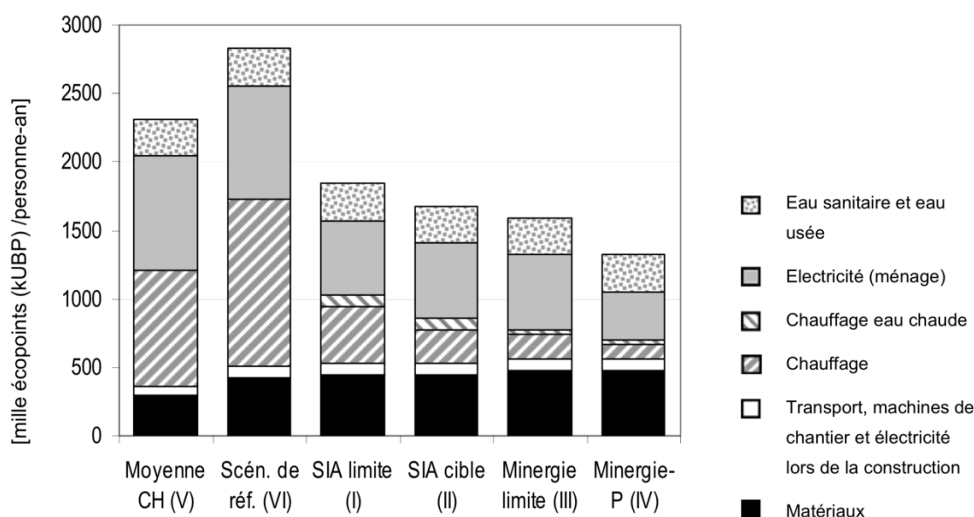


Figure 7. Ecopoints par type de bâtiment en Suisse (limite = valeur limites). Source : (Kaenzig et Jolliet, 2006).

Selon Heeren et al. (2015), l'impact des matériaux est moins important bien qu'il varie, bien entendu, selon leur type : l'impact du bois est par exemple plus faible que celui du béton. Étant donné que le bois a une inertie thermique plus faible, l'impact combiné bâti + énergie consommée est cependant très

proche d'un bâtiment en béton pour la plupart des indicateurs (avec une différence notable cependant en faveur du bois (-25%) en termes de réchauffement climatique).

Il est à noter, également, que l'impact annuel du bâti est proportionnel au nombre d'années de vie d'un bâtiment : plus celui-ci a une durée de vie longue, plus l'impact annuel du bâti sera réduit. En Suisse, la moyenne d'âge des bâtiments est supérieure à 45 ans et leur durée de vie supérieure à 100 ans. Dans le graphique ci-dessus, la durée de vie est de 50 ans (ce qui est faible) : avec une durée plus réaliste (plus de 90 ans), l'impact environnemental des matériaux sera quasiment divisé par deux. Dans le cas d'un bâtiment traditionnel, on passerait ainsi à un impact autour des 5% à 10% tandis qu'il serait de l'ordre de 15% pour un bâtiment Minergie.

Réduction de la consommation énergétique au cours du temps grâce à l'isolation

Les nouveaux bâtiments commencent à être isolés dans les années 1980. Cette isolation intérieure permet de faire chuter la consommation d'énergie pour le chauffage par m² chauffé. Théoriquement (selon les standards SIA), celle-ci chute à 17 litres de mazout équivalent par m² alors qu'elle était autour de 20 litres pour les bâtiments en pierre construits avant 1920 et 25 litres pour les bâtiments en béton ou plots construits dans les années 1950 (22 litres pour les bâtiments des années 1960 à 1970). Dans les années 1990, l'isolation intérieure devient plus épaisse et permet de faire chuter la consommation à 13 litres par m². Le passage à une isolation extérieure améliore l'inertie thermique dans les années 2000 et permet encore de faire chuter cette consommation à environ 10 litres par m². En 2010, les nouvelles constructions se rapprochent du standard Minergie et atteignent (théoriquement) environ 5 litres de mazout équivalent par m².

Il existe ainsi théoriquement **un facteur 4 entre les bâtiments les plus énergivores et les plus récents**. Le standard Minergie P descend même jusqu'à 3 litres par m² (facteur 8) et le standard Minergie Eco peut être neutre. Un bâtiment d'avant 1920 subissant une rénovation dite « lourde » peut ainsi également, théoriquement, diminuer sa consommation de mazout équivalent par 3.5 (de 20 à 6 litres). Le gain est encore supérieur (divisé par 4) pour les immeubles des années 1950.

Choix de la source énergétique

Dans le graphique ci-dessus, la source d'énergie pour le chauffage et de l'eau chaude sanitaire est le gaz naturel (dans le cas de référence et pour la moyenne Suisse). Comme le montre le tableau ci-dessous, **le choix de la source énergétique a des conséquences importantes en termes d'impact**. À Genève, à consommation égale, les émissions de CO₂ du mazout par kWh sont 30% supérieures à celles du gaz (voir le graphique ci-dessous, en colonne 2). Elles sont également 50% supérieures à celles de l'électricité (mix énergétique moyen en Suisse de l'énergie consommée) et 25 fois supérieures à celles du bois. Les émissions de CO₂ du chauffage à distance genevois (CAD) diffèrent selon si celui-ci est « réparti » (énergie fossile principalement) ou « tarifé » (inférieur en termes d'émission de CO₂ au mix électrique genevois) (OCEN, 2018 ; Département du territoire, 2006). Il est à noter que compte tenu de l'interconnexion entre les réseaux du CAD, la valeur utilisée dans ce rapport est de 50% de celle du gaz.

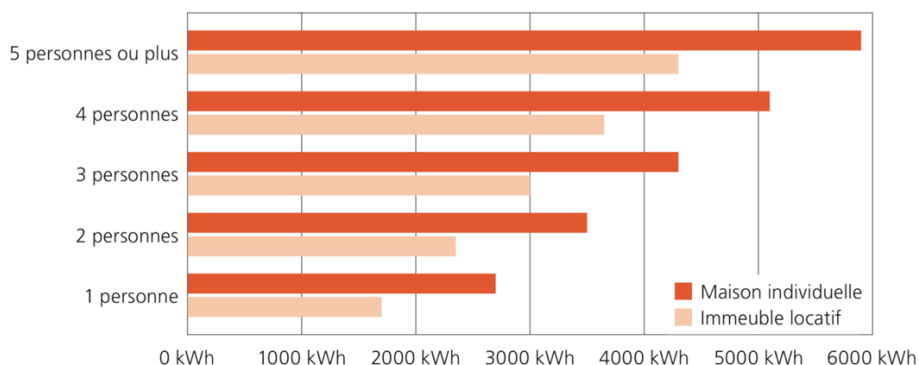
Vecteur énergétique	g CO2/kWh	kgCO2/m2	Proportion par rapport au mazout
Mazout	298	39	100%
Gaz	228	26	67%
CAD tarifé	108	11	28%
CAD réparti	263	28	72%
Electricité	139	11	28%
Bois	11	1	3%

Afin de représenter la réalité, cette vision en termes d'impact par kWh doit cependant être complétée pour considérer les besoins en énergie (indice de consommation moyenne (IDC) par m² des immeubles

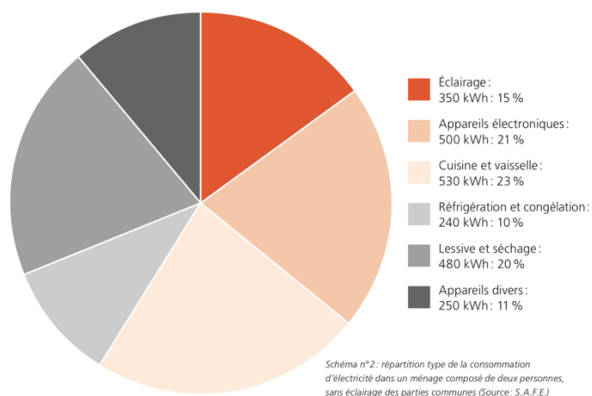
du parc genevois (en colonne 3). Les bâtiments chauffés au mazout ont, par exemple, un IDC plus élevé (469 MJ/m²) que les autres. Ils consomment ainsi en moyenne 15% de plus que ceux chauffés au gaz.

La consommation d'électricité n'est pas considérée dans cette étude

Comme indiqué dans la figure ci-dessous, la consommation annuelle d'électricité est fortement influencée par le type de bâtiment et le nombre de personnes par ménage (SuisseEnergie, 2018).



Cette consommation étant cependant fortement liée aux comportements volontaires comme le montre la figure ci-dessous, l'électricité n'est pas considérée dans cette étude.



9.2 Dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques

Dix modes d'habitat ont été modélisés à l'aide des informations statistiques disponibles au niveau des sous-secteurs statistiques.

L'impact de l'énergie est calculé en multipliant une consommation énergétique par vecteur énergétique par surface habitée par personne (en MJ/m²) et par un facteur d'émission par vecteur énergétique.

La surface par habitant

Ainsi que mentionné dans le Chapitre 4.2, les surfaces habitées par habitant ne sont pas directement disponibles pour Genève. Pour estimer cette donnée, quatre options sont possibles. La première, qui a été recommandée par l'OCSTAT, a été appliquée pour calculer les résultats.

Option 1 (recommandée par l'OCSTAT) : surface moyenne selon le nombre de pièces

- Surface totale par sous-secteur = surface moyenne par logement selon le nombre de pièces (OFS : T 09.03.01.14) x nombre de logement de chaque type
- Surface moyenne par habitant = surface totale par sous-secteur / nombre d'habitants par sous-secteur (statistique cantonale)

Les données de l'OFS sont basées sur un recensement (2000) complété par des estimations de 2000. Celui-ci est sujet à caution et des biais sont possibles, potentiellement dus au fait que le Registre des Bâtiments est lacunaire en particulier pour les villas.

De plus, cette approche ne considère que la taille des logements et non les espaces communs. La surface moyenne calculée par habitant est ainsi probablement inférieure à ce qu'elle est réellement. Cet aspect favorise ainsi, à première vue, les habitants des immeubles par rapport aux habitants des villas puisque les couloirs d'accès, partie du logement dans une villa, ne sont pas considérés dans les immeubles.

Option 2 : SITG

L'emprise au sol des bâtiments, le nombre d'étages par bâtiment et le nombre d'habitants par bâtiment sont renseignés dans les SITG, de même que la surface de référence énergétique. Il est donc possible de recréer une densité d'habitant par surface bâtie par sous-secteur, i.e. une surface moyenne bâtie par habitant.

Cette approche a l'avantage de considérer l'ensemble des surfaces, y compris les surfaces communes. Il a cependant le désavantage que le canton de Genève dénombre 21% de bâtiments à usage "mixtes" et qu'il n'est pas possible d'en connaître la partie non allouée au logement.

Option 3 : surface des bâtiments basée sur les types de bâtiments

Reconstruire les modes d'habitat à partir de profils types de bâtiment serait également possible. Bien que moins représentatif statistiquement, cette approche permettrait une modélisation plus fine et serait intéressant pour des cas d'études de cas spécifiques.

La consommation énergétique

La consommation énergétique peut être modélisée de trois manières différentes.

Option 1 : IDC (indice de dépense de chaleur, SITG) moyen et surface calculée par habitant

La consommation énergétique (indice de dépense de chaleur (IDC), exprimé en MJ/m²) peut être extraite des SITG par adresse et agrégée au niveau des sous-secteurs (voir tableau ci-dessous, pour 2017). Celle-ci peut ensuite être combinée avec les informations sur les surfaces moyennes de logement par habitant précédemment calculées afin de calculer les dépenses énergétiques annuelles par habitant. C'est cette option qui a été retenue. Les valeurs correspondent au document de référence fourni par l'OCEN (2018). Les autres approches n'ont pas été explorées.

Option 2 : IDC (indice de dépense de chaleur, SITG) moyen et SRE (Surfaces de référence énergétique, SITG)

Similairement à l'option 1, l'IDC peut être extrait des SITG par numéro de rue. Celui-ci peut ensuite être combiné par adresse avec les données de SRE extraites également des SITG. La consommation énergétique agrégée au niveau d'un sous-secteur peut ensuite être divisée par le nombre d'habitant pour calculer la consommation annuelle par habitant. Les SRE considèrent cependant 21% de surfaces mixtes. Cette approche n'a donc pas été appliquée.

Option 3 : Consommation d'énergie (SITG)

La consommation d'énergie est fournie par type de vecteur énergétique par adresse dans les SITG. Cette valeur considère cependant 21% de surfaces mixtes. Cette approche n'a donc pas été appliquée.

9.3 Sept modes d'habitat basés sur les cas d'étude

Sept modes d'habitat basés sur les cas d'étude ont été modélisés de manière détaillée (par étage, fonction et type de matériaux)⁴⁰ avec l'aide du bureau d'ingénieur Victor Martin Ingénieur grâce aux informations fournies par les architectes et habitants. Les informations manquantes sont basées sur un avis d'expert reflétant les pratiques courantes pour ces types de bâtiments. Le niveau de détail de la modélisation est illustré dans la figure ci-après.

Partie d'ouvrage	Eléments	Matériaux	Longueur	Largeur/Hauteur	Epaisseur m	Facteur	Surface m2	Volume m3
0. Excavation	Déblais	MEX						0.0
0. Excavation	Remblais	Grave						0.0
1. Fondations	Dalle de propreté	Béton maigre			0.05		480	24.0
1. Fondations	Radier	Acier armature				150		132.0
1. Fondations	Radier	Béton armé			0.3		440	132.0
2. Sous-Sol	Dalle	Acier armature				120		105.6
2. Sous-Sol	Dalle	Béton			0.24		440	105.6
2. Sous-Sol	Isolation extérieure	XPS	64	1.0	0.24		64	15.4
2. Sous-Sol	Murs	Acier armature				90		95.0
2. Sous-Sol	Murs ext.	Béton	64	2.7	0.22			38.0
2. Sous-Sol	Murs int.	Béton	96	2.7	0.22			57.0
3. RDC	Chape	Mortier			0.07		400	28.0
3. RDC	Plancher	Parquet Bois			0.015		180	2.7
3. RDC	Plancher	Carrelage céramique			0.01		80	0.8
3. RDC	Cloisons revêtement	Plâtre plaque	20	3.0	0.02			1.2
3. RDC	Cloisons isolant	Laine de roche	20	3.0	0.08			4.8
3. RDC	Cloisons ossature	tôle métallique	20	3.0		8.00E-04		0.048
3. RDC	Enduit	Plâtre			0.005		815	4.1
3. RDC	Revêtement extérieur	Béton préfab.	60	3.0	0.08		180	14.4
3. RDC	Revêtement extérieur	Acier armature				80		14.4
3. RDC	Dalle	Acier armature				120		96.8
3. RDC	Dalle	Béton			0.22		440	96.8
3. RDC	Fenêtres	Double vitrage					84	
3. RDC	isolant phonique	Mousse			0.05		400	20.0
3. RDC	Isolation extérieure	PUR	90	3.0	0.26		270	70.2
3. RDC	Murs	Acier armature				90		82.5
3. RDC	Murs ext.	Béton	60	3.0	0.15			27.0
3. RDC	Murs int.	Béton	65	3.0	0.18			35.1
4. Etage	Chape	Mortier			0.07		400	28.0

Trois bâtiments⁴¹ ont été considérés :

- Immeuble récent en écoquartier : Les Vergers à Meyrin, bâtiment Rez + 5 étages en structure bois. Le bâtiment est modélisé en se basant sur les plans d'architectes (fournis par les architectes du projet) et les modèles de consommation d'énergie (fournis par l'Université de Genève).
- Immeubles récents, bâtiment Rez + 5 étages en béton armé avec façade en éléments béton préfabriqués : La Chapelle à Lancy. Les plans d'architectes n'ayant pas pu être obtenus, l'immeuble a été modélisé sur le même gabarit que le bâtiment des Vergers mais en considérant les matériaux (quantités et types) propres à ce type de bâtiment. La consommation d'énergie provient de l'IDC disponible sur le SITG et le vecteur énergétique fournit par un contact avec l'équipe thermique de SIG (CAD).
- Villa récente : maison en béton Rez + 1 étage en béton armé. Le bâtiment est modélisé en se basant sur les plans d'architectes (fournis par l'habitant) et les consommations réelles d'énergie

⁴⁰ Aspects considérés : matériaux et technique du bâtiment (installations de chaleur, ventilations, etc.)

⁴¹ Une durée de vie identique a été considérée pour tous les bâtiments : 100 ans.

(fournies par l'habitant). Par analogie, la même villa a ensuite été utilisée pour les calculs dans trois endroits différents : dans le canton de Vaud proche de Nyon (Dullier), en France voisine proche du CEVA (Machilly), en France dans les environs d'Annecy (Poisy). Concernant les impacts liés au logement, cette localisation influe sur le type d'énergie utilisée pour le chauffage (mazout et électricité).

Les nouveaux immeubles ont une meilleure performance environnementale⁴² que celle des modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques pour les raisons suivantes :

- Une consommation énergétique réduite
- Une énergie du CAD à impact carbone réduit
- Une localisation proche du centre

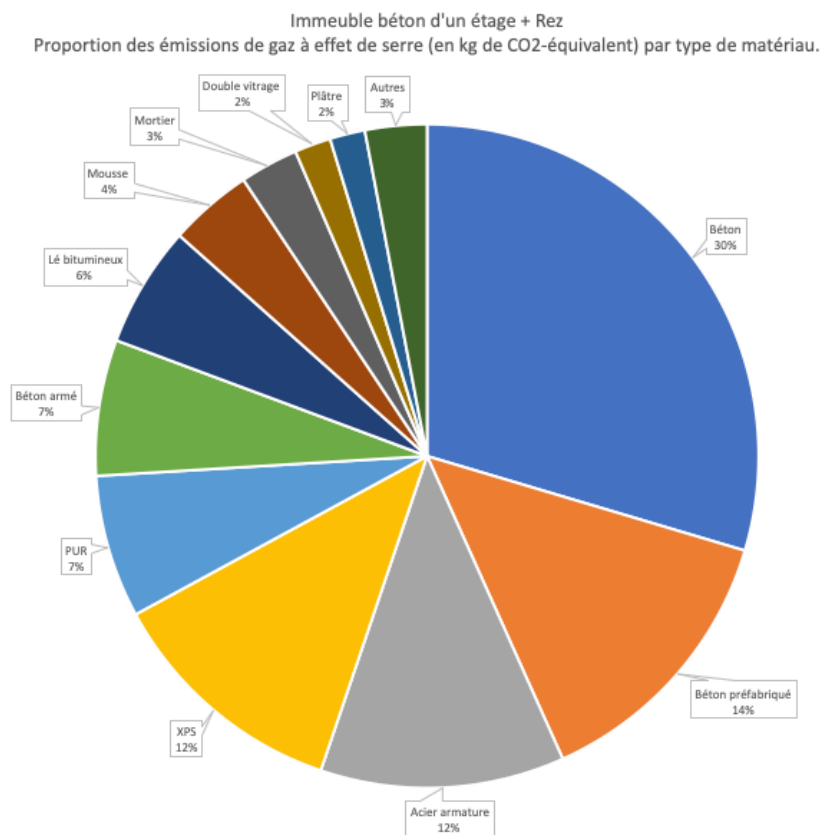
Les villas ont une relativement bonne performance environnementale du point de vue de la consommation énergétique mais sont pénalisées par l'utilisation de mazout.

En matière de consommation énergétique, les deux immeubles ont une consommation énergétique par m² (IDC) d'environ 200 MJ/m² tandis que la consommation de la villa est d'environ 300 MJ/m² (50% de plus par m²). Ces valeurs sont conformes aux attentes. Étant donné que dans la villa, la surface par habitant est de 27% supplémentaire, la consommation par personne est donc d'environ 90% supplémentaire.

Quant au bâti, habiter dans une maison en béton (45 m² par personne) induit un impact carbone liés aux matériaux 60% plus important que dans un immeuble en béton préfabriqué (36 m² par personne). Ceci est dû à la moindre quantité de matériaux (26% d'impact en plus par m² dans la maison) et à la surface inférieure par personne. Habiter dans un immeuble performant d'un point de vue des matériaux permet de réduire l'impact par personne de 30% par rapport à un bâtiment en béton préfabriqué.

Dans un immeuble d'un étage + Rez, 45% à 50% de l'impact des matériaux est induit par les fondations, le sous-sol et le toit, 28-32% par le Rez-de-chaussée et 22 à 24% par l'étage. Une illustration de la contribution des différents matériaux au réchauffement climatique pour un immeuble en béton (seul le Rez + un étage sont ici considérés) est proposée ci-dessous. Un immeuble de 5 étages + Rez induit environ 90% d'impact supplémentaire par rapport à un immeuble d'un étage + Rez.

⁴² L'évaluation de l'impact des matériaux et de la consommation énergétique est considérée satisfaisante et en ligne avec la littérature.



Quelle est l'importance de la durée de vie ? Réduire la durée de vie d'un bâtiment par deux (de 100 ans à 50 ans) va augmenter l'impact annuel par deux. Démolir deux villas de 50 ans (qui aurait pu durer 100 ans) pour construire un immeuble de 5 étages + Rez induit ainsi environ 10% de plus d'impact par personne par an pour les futurs habitants de l'immeuble (car sur les 50 premières années de l'immeuble s'ajoute l'impact des années perdues des villas).

10 Annexe 2. Modélisation de la mobilité pendulaire

Un état des connaissances sur les impacts environnementaux de la mobilité est tout d'abord présenté. Cette annexe comporte ensuite les données complémentaires et hypothèses concernant la modélisation de la mobilité pendulaire pour les différents modes d'habitat.

10.1 Les impacts environnementaux de la mobilité : état des connaissances

Les impacts environnementaux des déplacements comprennent l'ensemble des infrastructures, des véhicules et de l'énergie nécessaires au déplacement : la construction et l'entretien des routes/chemins de fer, la construction, l'entretien et la fin de vie des véhicules ainsi que la consommation d'essence ou d'électricité lors de la phase d'utilisation.

Une comparaison des impacts environnementaux des modes de transports pour une personne transportée sur un kilomètre est présentée ci-dessous (en écopoints) (Kaenzig et Jolliet, 2006). Les valeurs représentent des valeurs moyennes (consommation, remplissage moyen, etc.), représentatives de la situation Suisse. Les valeurs liées au train longue distance et à l'avion sont également données à titre de comparaison.

Les transports publics ont, à première vue, un impact inférieur aux moyens de transport individuels. Un trajet en transport public électrique est ainsi quatre fois moins impactant qu'un trajet effectué seul en voiture. La différence entre les modes de transports individuels et publics s'atténue cependant fortement lorsqu'un trajet en voiture est partagé par plusieurs personnes (le taux de remplissage de la voiture est clé). Un trajet en transport public électrique est ainsi similaire à un trajet en voiture de quatre personnes alors qu'un trajet en bus est deux fois plus impactant.

Il est à noter que la contribution des véhicules est basée sur des hypothèses sur la durée de vie de ces derniers. Une diminution de moitié de la durée de vie (par exemple suite à un remplacement ou un accident) double ainsi l'impact induit par les véhicules par kilomètre parcouru.

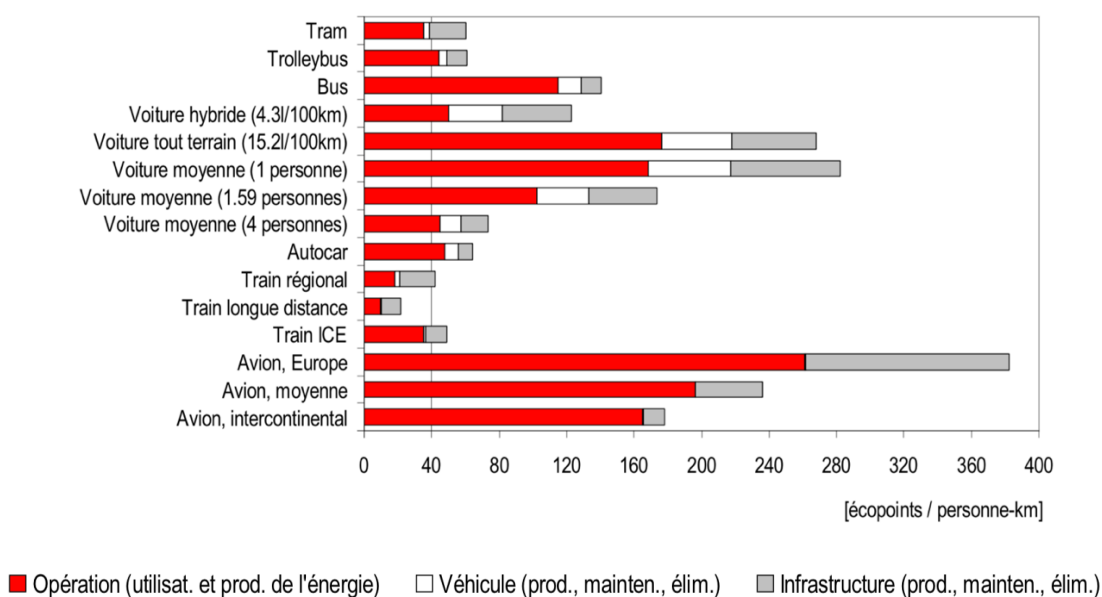


Figure 8. Ecopoints par mode de transport (écopoints/personne.km). Source : (Kaenzig et Jolliet, 2006).

10.2 La mobilité pendulaire

Dans ce rapport, l'impact de la mobilité pendulaire est calculé à l'aide de la **distance moyenne annuelle parcourue par mode de transport entre le lieu de domicile et le lieu de travail**. Cette distance est ensuite multipliée par des facteurs d'émission propre à chaque mode de transport. Les facteurs d'émission utilisés considèrent l'entier du cycle de vie, c'est-à-dire l'impact environnemental lié aux infrastructures, au véhicule ainsi qu'à l'énergie utilisée pour se déplacer. Les données du Microrecensement, présentées dans le Tableau 7, considèrent l'ensemble de la mobilité pendulaire, y compris la mobilité inter-cantonale, en kilomètres parcourus annuellement par mode de transport. La décomposition des données est au niveau des zones typologiques (décomposition statistiquement représentative la plus fine disponible).

Mode	Centre	Première couronne	Deuxième couronne	Périurbain	Nyon - agglo	France proche	France proche CEVA	France lointain
Voiture conducteur	211	324	483	680	1733	1362	787	2095
Voiture passager	38	18	36	70	55	91	43	140
2RM	102	84	109	151	38	182	203	279
Train	192	44	151	119	621	125	108	192
Autres TC	166	197	196	189	16	11	478	16
TIM+TC	102	7	18	85	171	16	16	24
Marche	52	42	18	20	18	12	103	19
Vélo	71	32	59	82	28	19	79	29
Total	934	748	1070	1397	2680	1816	1816	2794

Tableau 7. Mobilité pendulaire : Distance annuelle moyenne (km) parcourue par mode de transport et par périmètre. Source : Observatoire statistique de la mobilité.

La mobilité pendulaire des modes d'habitat situés sur les cantons de Genève et Vaud a été modélisée à l'aide des données issues du microrecensement 2015, au niveau des secteurs typologiques (centre, première couronne, deuxième couronne, périurbain). À l'exception de l'hypothèse suivante :

- Pour le mode d'habitat Ibis, qui correspond à un scénario projeté du comportement moyen de mobilité pendulaire des habitants des Vergers (moins de voiture car écoquartier), on a considéré la même répartition modale que pour le centre (tout en gardant des distances propres à la localisation effective des Vergers (première couronne)). Ce scénario a été ajouté car les données statistiques datant de 2015 ne reflétaient pas encore les comportements de mobilité pendulaire de l'écoquartier.

De plus, les hypothèses suivantes ont été émises :

- Pour le mode « TIM + TC » (soit un usage combiné de la voiture et d'un transport public), on a considéré une part égale entre la voiture et les transports collectifs.
- Le mode « voiture conducteur » a été divisé en deux groupes « voiture conducteur » représentant les conducteurs avec passagers et « voiture seul » sur l'hypothèse que les voyages à plusieurs sont effectués à deux personnes.
- Les distances annuelles sont calculées en considérant un emploi à 100% avec 4 semaines de vacances : 48 semaines de 5 jours.

La mobilité pendulaire des modes d'habitat situés en France a été modélisée de la manière suivante :

- O. Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France) : Distance valant le double de celle du périurbain et parts modales suivantes : 75% voiture conducteur, 5% passager, 10% 2RM.
- N. Petites villas récentes > 2000 / Machilly (France) : Distance similaire au périurbain et parts modales similaires au mode d'habitat O.
- Nbis. Petites villas récentes > 2000 / Machilly avec Léman express (France) : Distance identique que pour N mais avec parts modales similaires correspondant à la première couronne.

11 Annexe 3. Hypothèses de travail



REPUBLIQUE ET CANTON DE GENEVE
Département du territoire
Direction générale de l'environnement

NOTE INTERNE

Aux mandataires de groupe de suivi
27 septembre 2018

Mandat impact environnemental des modes d'habitats

Hypothèses de travail:

Il est attendu que le mandat apporte des réponses aux hypothèses suivantes:

- La localisation des modes d'habitat influence la mobilité et partant la consommation de ressources naturelles.
- La densité des modes d'habitat influence la consommation énergétique, de sol, la biodiversité, la quantité et la qualité des espaces verts.
- Les modes d'habitat influencent le tissu bâti et donc les espaces verts et la biodiversité.
- Les modes d'habitat influencent les ressources mobilisées pour la construction.
- Une même densité bâtie, peut avoir divers impacts environnementaux (selon le tissu bâti, le mode de construction, l'éloignement du centre-ville, etc.).
- Un habitat dense bien desservi par les TP à un moindre impact environnemental par habitant, qu'un habitat individuel avec une faible desserte TP. Rapporté à l'habitant le principe de la ville compacte se vérifie comme ayant un moindre impact environnemental.
- Un tissu bâti peu dense (villa individuelle) implique une plus grande imperméabilisation de surface au sol par habitant qu'un tissu dense (habitat collectif central).
- La mobilité générée par l'habitat des zones à faible densité, excentrées et mal desservies par les TP, a des impacts environnementaux et sur la santé des habitants au-delà des dites zones.
- Il existe un potentiel important de réduction de l'impact environnemental et de gain de qualité (environnement, biologie, bruit, air, santé) dans les zones centrales bien desservies par les TP et la MD par la limitation de la circulation automobile venant de l'extérieur (meilleure qualité de l'air, nouvelles possibilités d'arborisation, gain en espaces verts et publics sur les espaces de stationnement, etc.).
- La mutation de tissus composés de villas en tissus plus denses peut être réalisée en préservant les qualités écologiques du tissu initial si une attention particulière est portée au respect des espaces verts et arborés existants ou à leur intégration, ainsi qu'à la qualité des constructions et à la qualité de la desserte TP et MD.
- Les modes d'habitat influence les choix des systèmes énergétiques.
- Les modes d'habitat influence la politique de déploiement des réseaux thermiques.

2018_09_27_hypothèses étude types habitats et environnement VF.docx

Service de l'environnement et des risques majeurs • Quai du Rhône 12 • 1205 Genève
Tél. +41 (0) 22 388 80 30 • E-mail serma@etat.ge.ch • www.ge.ch/serma
Lignes TPG 14, D – arrêt Palladium

- Les choix des matériaux de construction et les systèmes énergétiques ont un impact sur l'environnement.
- Le comportement individuel impact les résultats du collectif par rapport aux objectifs des différentes politiques publiques.

Groupe de suivi/27.09.2018